Ann. agron., 1962, **13** (1), 5-19.

Vol. 13 - n° 1 - 1962 -

551. 623 : 554. 03

ÉTUDE CINÉTIQUE DE LA DISSOLUTION ACIDE D'UNE VERMICULITE

J. CHAUSSIDON et M. VILAIN

Station centrale d'Agronomie, Centre national de Recherches agronomiques, Versailles (Seine-et-Oise).

SOMMAIRE

Une vermiculite est soumise à des attaques en milieu acide à des températures et pendant des temps variables. On étudie la mise en solution de la couche octaédrique.

Le fer est présent dans le réseau à la fois à l'état trivalent, surtout en couche tétraédrique et divalent en couche octaédrique.

INTRODUCTION

On constate expérimentalement qu'il est impossible d'obtenir une suspension de vermiculite jouissant de propriétés acides, soit après traitement par un acide, soir après passage sur une colonne de résine échangeuse d'ions protonique.

La capacité d'échange de l'argile est en effet alors toujours saturée essentiellement par du magnésium.

Nous avons ainsi été conduits à étudier systématiquement le passage en solution de certains cations de constitution, qui proviennent, en conditions acides, d'une autodestruction du réseau. Nous nous sommes particulièrement attachés à l'aspect cinétique du problème, qui présente à la fois un intérêt fondamental, et un intérêt pratique concernant la préparation et la manipulation de ce matériel.

Le minéral étudié est une vermiculite du Transvaal. On rappellera qu'il s'agit d'une argile à trois couches, la couche octaédrique étant trioctaédrique et pratiquement entièrement magnésienne ainsi qu'en témoigne la formule structurale

$$Si_{3,22}\ (Al\ Fe^{3})_{0,73}\ (Al\ Fe^{3})_{0,14}\ (Mg\ Fe^{2})_{2,86}\ O_{10}\ (OH)_{2}\ M^{+}_{0,64}.$$

Le fer est présent dans le réseau à la fois à l'état trivalent, surtout en couche tétraédrique et divalent en couche octaédrique.

I. — MÉTHODES UTILISÉES

(a) *Généralités.*

Le matériel brut qui provient d'un gisement subit une purification de fait à la suite de la séparation par sédimentation des particules de taille inférieure à 2μ. La suspension colloïdale ainsi obtenue est saturée en ions Na^+ pour qu'il n'existe aucune ambiguïté quant à l'origine du magnésium après attaque acide.

(b) *Réalisation de l'attaque acide.*

Des fractions aliquotes de suspension de titre en argile bien déterminé, sont placées au contact de volumes d'acide chlorhydrique normal, dans un bain thermostaté à 0,1°C près. Les essais sont conduits à différentes températures et pendant des temps différents. A la suite des travaux de GASTUCHE et DELMON (GASTUCHE et coll., 1960) les volumes réactionnels ont été choisis de telle façon que la réaction ne soit pas empoisonnée.

Après attaque, la phase solide est séparée par centrifugation, les produits de la réaction sont dosés sur le surnageant. Le culot lavé et séché est conservé pour les mesures de surface.

(c) *Méthodes analytiques.*

1° *Magnésium.*

Le dosage est effectué par le Versenate 0,01 M (Indicateur noir ériochrome T). Les métaux lourds sont complexés par KCN ou séparés par précipitation selon le degré de l'attaque.

2° *Fer.*

Le fer est dosé colorimétriquement à 5 150 Å, après formation du complexe rouge orthophénantroline Fer, les ions ferriques étant réduits au préalable par l'hydroxylamine.

3° *Surfaces.*

Les mesures de surface sont faites par adsorption d'azote à — 196°C, les résultats expérimentaux étant traités par la théorie de BRUNAUER, EMMETT et TELLER (BRUNAUER, 1951).

II. — RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

A. — CINÉTIQUE CHIMIQUE DE LA DÉGRADATION DU MINÉRAL

L'attaque du réseau cristallin a été étudiée en suivant la mise en solution du magnésium et du fer de constitution.

La solubilisation du magnésium rend compte uniquement de la dégradation de la couche octaédrique, puisqu'il ne peut se présenter à l'état de coordinence quatre.

La solubilisation du fer est, ainsi qu'on le verra plus loin, d'une interprétation plus complexe, puisque le fer de constitution se trouve à l'état de coordinence quatre ou six.

Les rôles de la température et de la durée de l'attaque acide ont été successivement étudiés.

1° *Attaque à durée constante et à température variable.*

20 ml de la suspension (200 mg d'argile) sont placés au contact de 50 ml d'acide chlorhydrique normal pendant une heure à des températures variant de 0°C à 80°C (fig. 1 et 2).

On constate aussi bien pour le fer total que pour le magnésium, que les courbes ont l'allure générale d'une exponentielle, ce qui est vérifié par l'obtention de graphiques linéaires en coordonnée semi-logarithmiques.

2° *Attaques à durées et températures variables.*

Les données expérimentales restent les mêmes qu'au paragraphe précédent. La réaction n'est pas « empoisonnée » le rapport du magnésium total extractible à la quantité d'acide présent étant de l'ordre de 5 %.

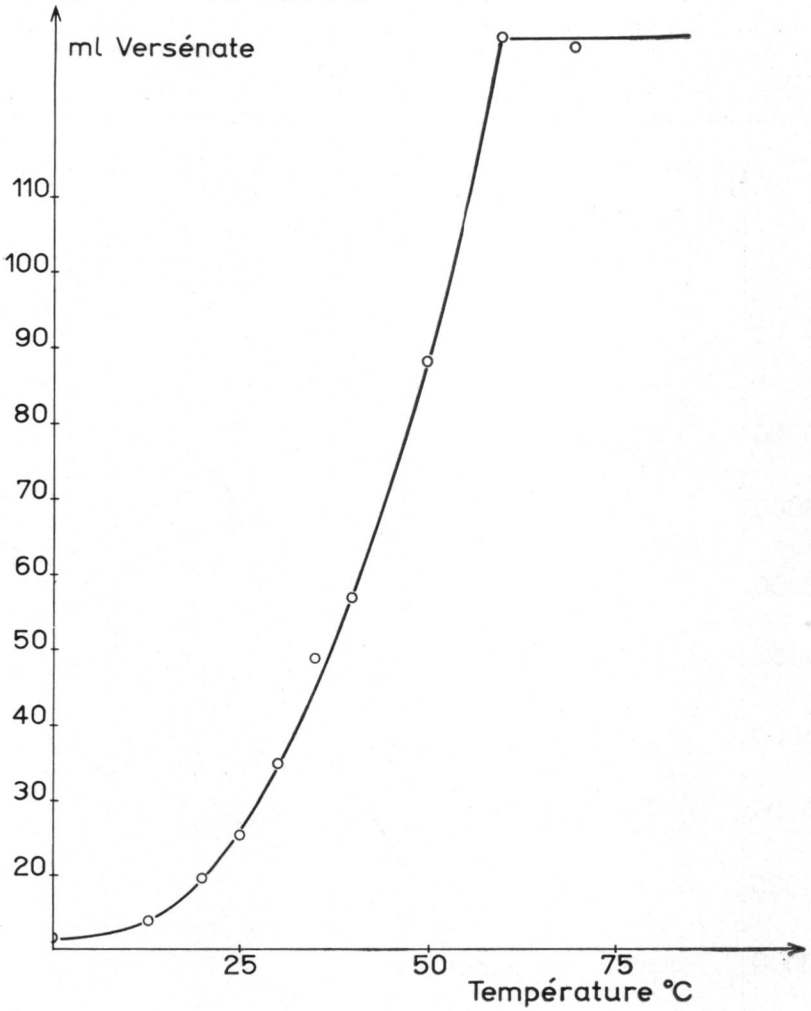


FIG. 1.

Ce fait est corroboré par la non-variation, expérimentale de la quantité d'acide présente dans le milieu entre l'instant initial et l'instant final de l'attaque.

a) Mise en solution du magnésium.

TABLEAU I

Milligramme de magnésium dosé (attaque acide de 200 mg d'argile)

Durée	Température				
	25°C	30°C	35°C	40°C	45°C
30 min	4,86	7,05	8,87	10,70	14,59
1 h	—	8,99	11,49	14,83	19,82
2 h	10,70	12,40	16,78	20,67	26,26
3 h.....	12,16	15,56	19,45	24,32	29,42

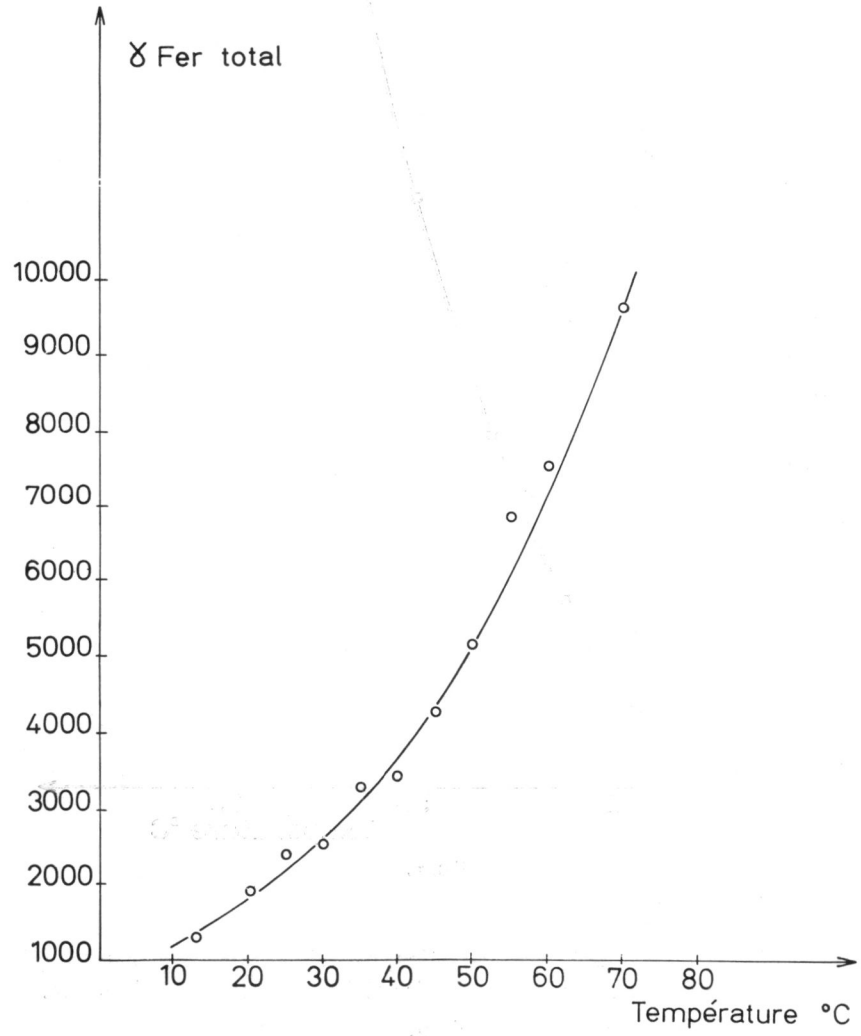


FIG. 2.

Ces résultats sont représentés graphiquement dans la figure 3.

b) Mise en solution du fer total.

TABLEAU 2

Milligramme de Fer dosé (attaque acide de 200 mg d'argile).

Durée	Température				
	25°C	30°C	35°C	40°C	45°C
30 min.....	1,3	1,7	2,4	—	3
1 h.....	—	2,5	3,25	3,55	4,7
2 h.....	2,55	—	4,25	4,85	5,65
3 h.....	3,15	3,9	5,1	5,75	5,95

Ces résultats sont représentés graphiquement dans la figure 4.

B. — ETUDE DE LA SURFACE B. E. T. EN FONCTION DU DEGRÉ D'ATTAQUE

Les surfaces B. E. T. ont été mesurés sur les résidus solides des attaques acides On constate une augmentation de ces surfaces avec le degré de l'attaque, exprimé par sa durée à température constante.

Durée d'attaque	30 min	45 mn	1 h	2 h	3 h	5 h	6 h	16 h	25 h	50 h
Surface B.E.T. m^2/g	64,9	59,4	115,7	140,6	143	188	202	330	331	351

Ces résultats sont représentés graphiquement dans la figure 5.

III. — INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS DE CINÉTIQUE CHIMIQUE

A. — GÉNÉRALITÉS

Le but essentiel de ces mesures est de déterminer l'énergie apparente d'activation de la réaction d'attaque des différentes couches du minéral argileux.

Rappelons que cette énergie peut être facilement déterminée si l'on connaît les constantes de vitesse de la réaction à différentes températures. En effet si k est la constante de vitesse à une température T°K la représentation d'ARRHENIUS, $\text{Log } k = f\left(\frac{1}{T}\right)$ donne un graphique linéaire dont la pente p est reliée à l'énergie d'activation par l'expression $p = \frac{E}{R}$ avec E : énergie apparente d'activation.

R : constante molaire des gaz parfaits.

Toutes les mesures étant effectuées à volume constant, on pourra remplacer le terme « concentration » utilisé habituellement en cinétique par le terme « quantité ».

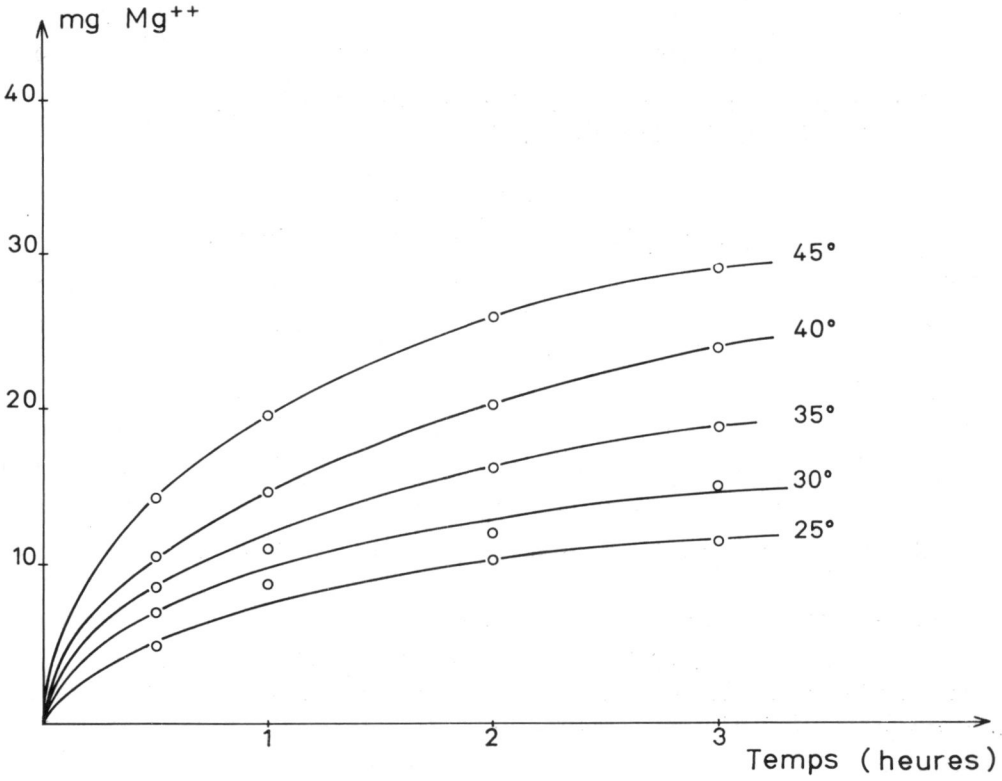

mg Mg++
40
30
20
10
45°
40°
35°
30°
25°
1
2
3
Temps (heures)

FIG. 3.

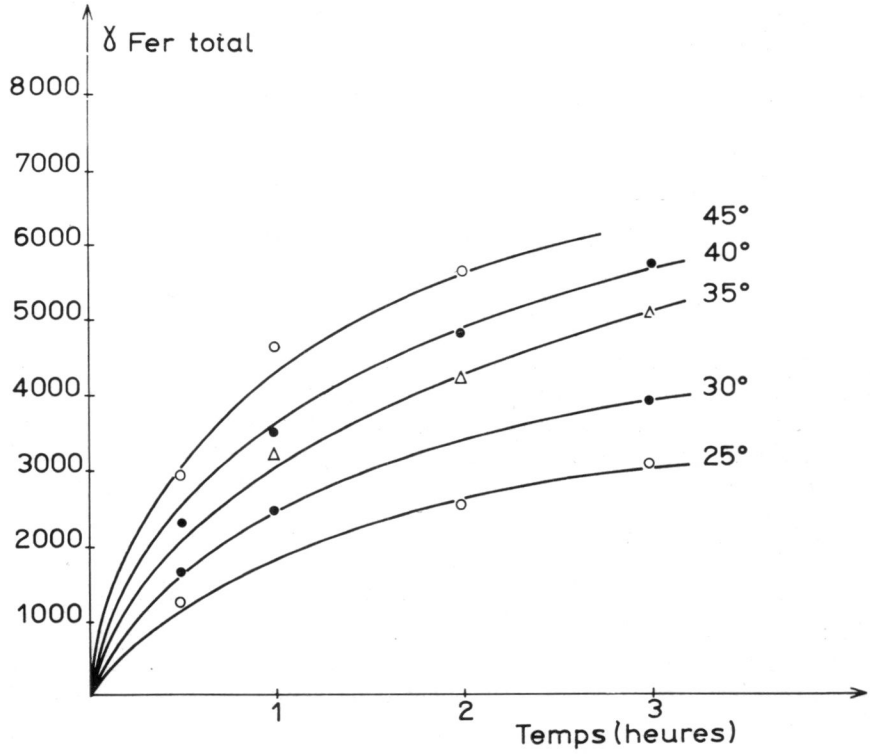

γ Fer total
8000
7000
6000
5000
4000
3000
2000
1000
45°
40°
35°
30°
25°
1
2
3
Temps (heures)

FIG. 4.

On a repris successivement les principes de calcul proposés d'une part par LAUDELOUT et EECKMANN (LAUDELOUT, EECKMAN 1958) et d'autre part par GASTUCHE et DELMON (GASTUCHE, et coll. 1960).

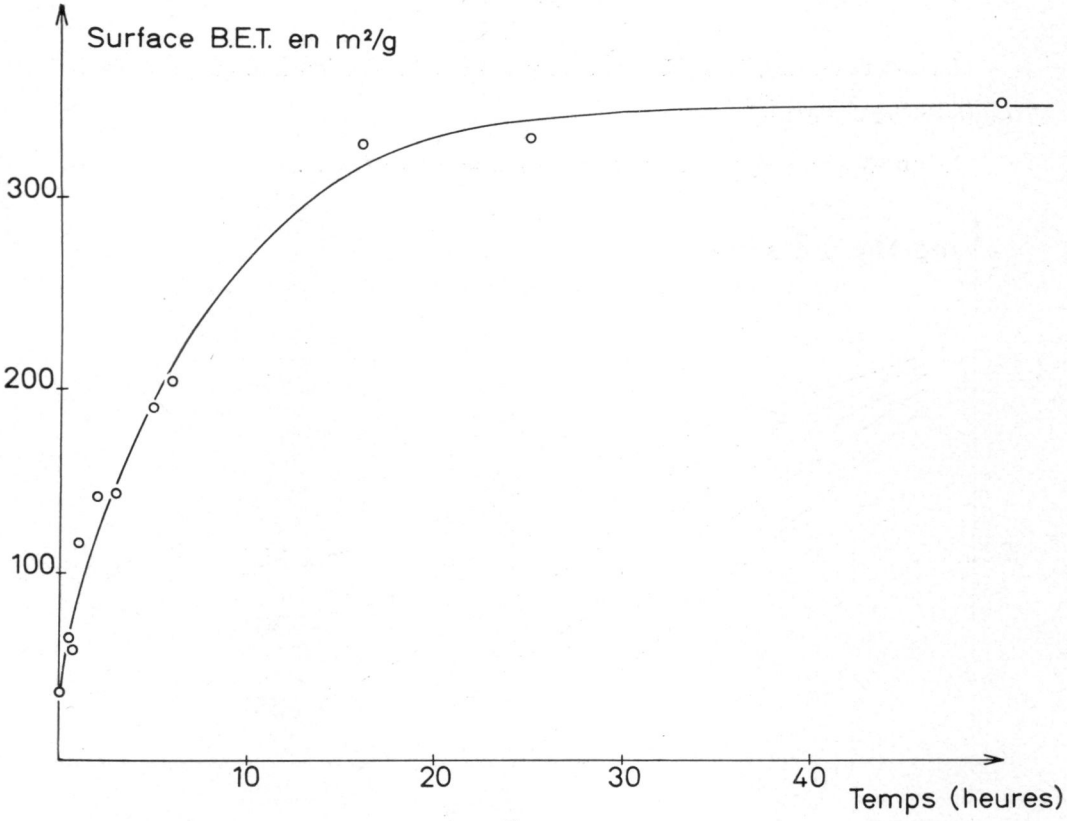


FIG. 5.

B. — MISE EN SOLUTION DU MAGNÉSIUM

1° *Calculs selon* LAUDELOUT *et* EECKMANN

On peut voir que la quantité de magnésium libérée par l'attaque acide du réseau suit une loi parabolique en fonction du temps.

Désignons par :

x_0 : la quantité de magnésium initialement présente dans le réseau

x : la quantité du même élément libérée au temps t.

On constate que le graphique représentatif de la fonction :

$$(x_0 - x) = f(\sqrt{t})$$

est une droite de pente k' ; cette pente est directement reliée à la constante de vitesse de la réaction ainsi que le montre le calcul suivant :

$$\frac{d(n_0 - x)}{dt} = \frac{k'}{2\sqrt{t}} \text{ soit}$$

avec $$t = \frac{x_0 - x}{k'}$$

$$\frac{(x_0 - x)}{dt} = \frac{k'^2}{2} \frac{1}{w_0 - x}$$

La constante de vitesse K reliant la vitesse de la réaction à la quantité réagissante est ici égale à $\frac{k'^2}{2}$

Le graphique 6 représente les fonctions $(x = x_0) = f(\sqrt{t})$.

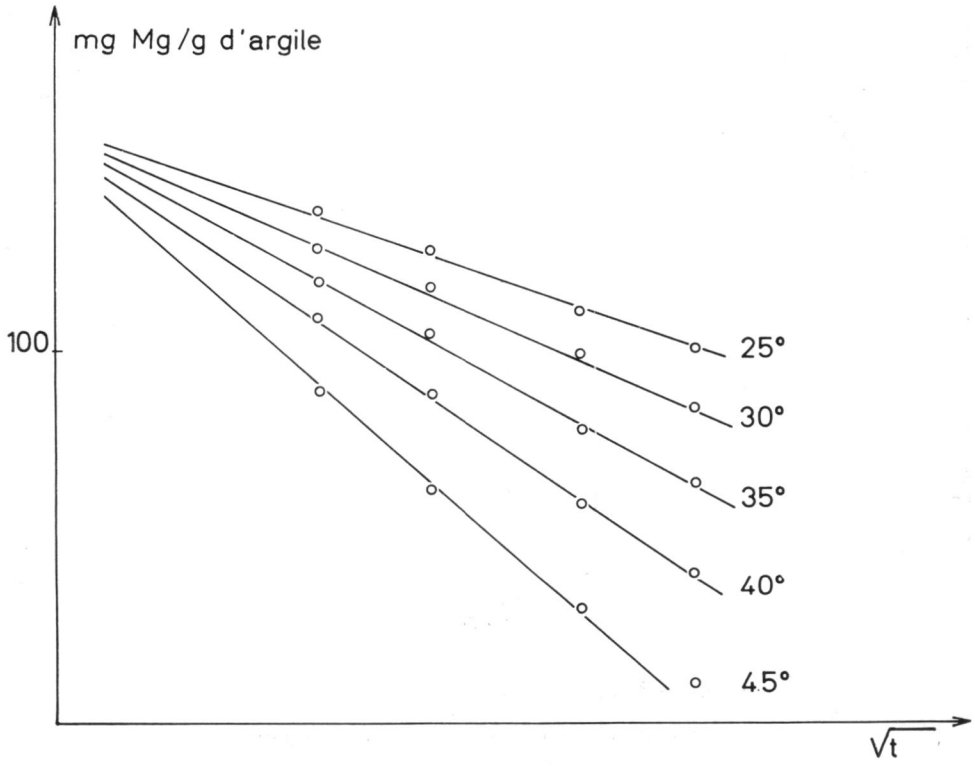


FIG. 6.

La pente des différentes droites correspondant à différentes températures permet d'évaluer la constante K :

0°C	k' mg Mg^{++}/g $h^{-1/2}$	K (mg $Mg^{++}/g)^2$ h^{-1}
25	34 10^{-3}	578 10^{-6}
30	43 10^{-3}	924,5 10^{-6}
35	54 10^{-3}	1 458 10^{-6}
40	68 10^{-3}	2 312 10^{-6}
45	88 10^{-3}	3 872 10^{-6}

On peut dès lors construire le diagramme d'ARRHENIUS en portant

$$\log K = f\left(\frac{1}{T}\right)$$

A partir de ce diagramme (graph. 7) on calcule une énergie apparente d'activation de 18,4 K cal-mole.

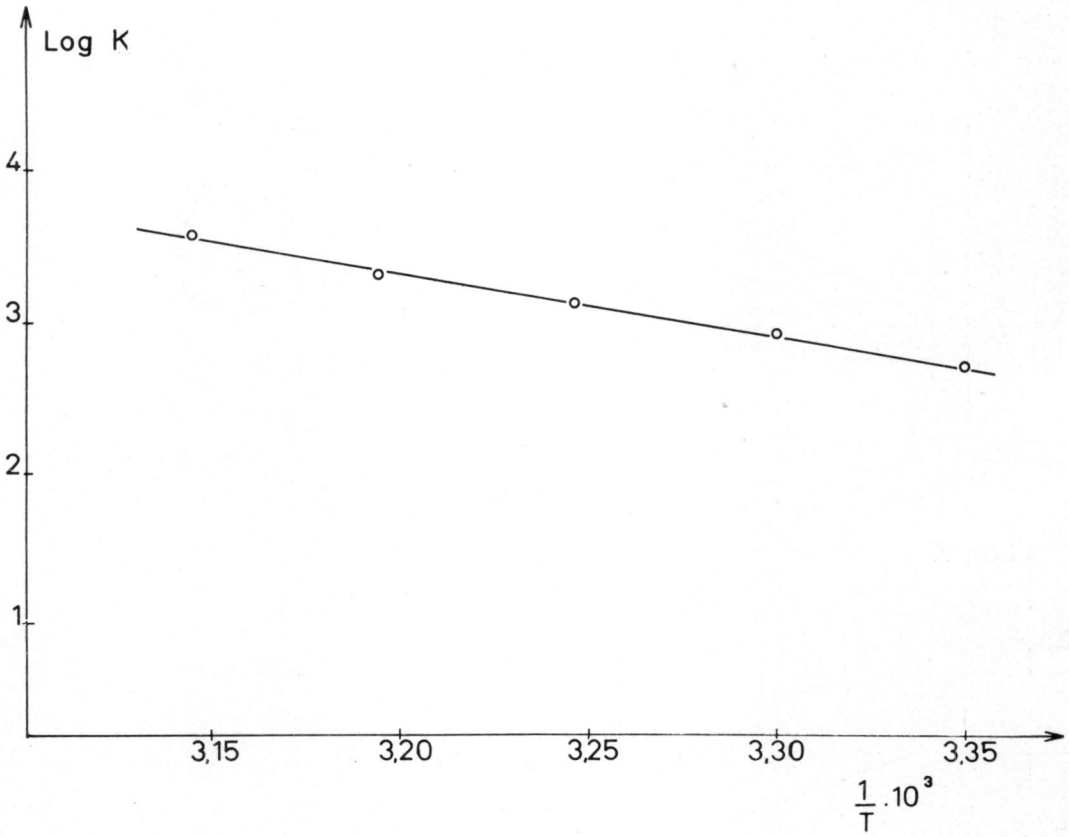


FIG. 7.

2° *Calculs selon* GASTUCHE *et* DELMON

Ces auteurs définissent le degré d'avancement de la réaction « α » comme « la fraction du réactif solide transformé au bout du temps t. $(1 - \alpha)$ est alors le rapport du volume restant au volume initial ».

« La vitesse interfaciale k' est la vitesse linéaire avec laquelle l'interface avance vers l'intérieur suivant la normale à sa surface ».

Elle est liée à « α » par relation.

$$(1 - \alpha)^{1/3} = 1 - k't$$

k' étant fonction de la concentration et de la température.

Le graphique n° 8 représente les variations de $1 - (1 - \alpha)^{1/3}$ en fonction du temps, pour des attaques effectuées à différentes températures.

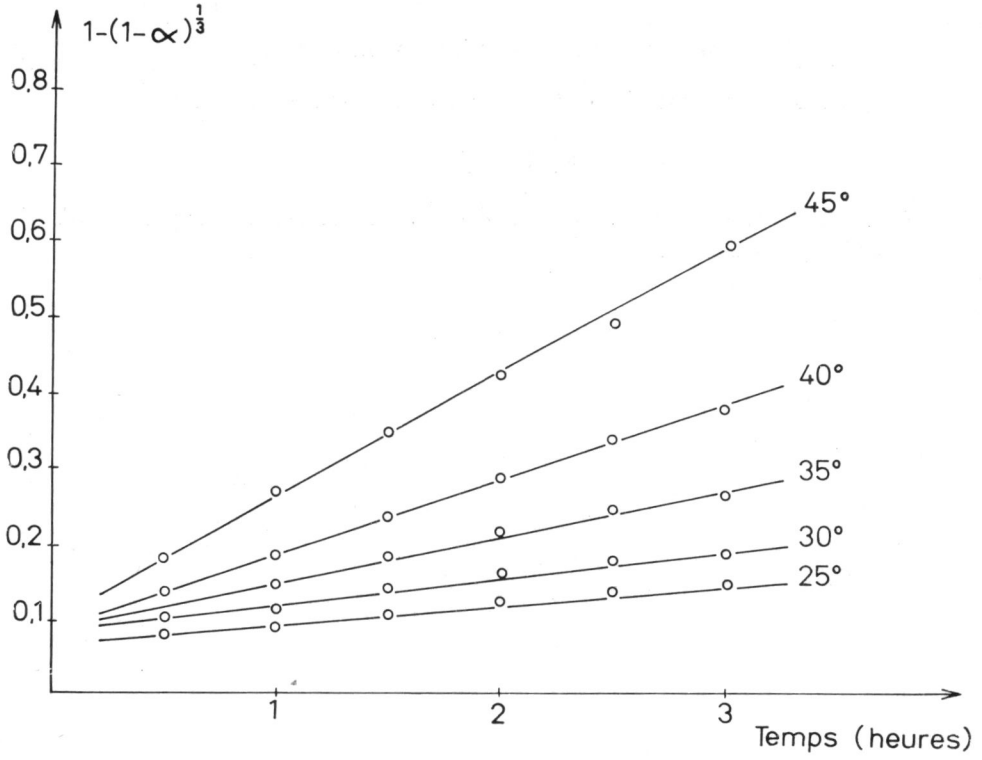

1-(1-α)^1/3
0,8
0,7
0,6
0,5
0,4
0,3
0,2
0,1
45°
40°
35°
30°
25°
1
2
3
Temps (heures)

FIG. 8.

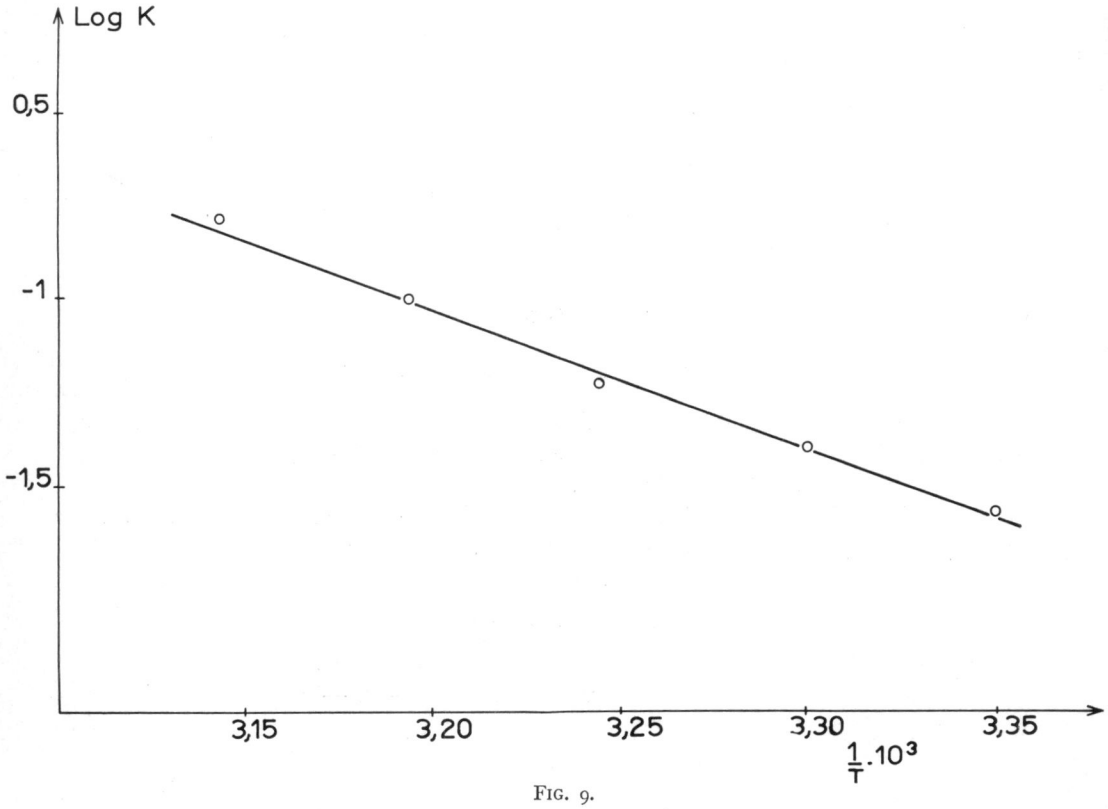

Log K
0,5
-1
-1,5
3,15
3,20
3,25
3,30
3,35
1/T .10³

FIG. 9.

Les valeurs de k' déduites de ce graphique sont indiquées dans le tableau suivant :

Valeurs de k' — vitesse interfaciale.

0°C	k'
25	0,0275
30	0,0400
35	0,0600
40	0,1000
45	0,1675

A partir de ces valeurs de « k' », la représentation d'ARRHENIUS (graphique 8) permet de calculer une énergie apparente d'activation de 19 Kcal/mole.

Il est remarquable de noter l'excellente concordance entre les valeurs de l'énergie apparente d'activation calculée par ces deux méthodes.

C. — MISE EN SOLUTION DU FER

Ainsi qu'on l'a rappelé précédemment, la cinétique de solubilisation du fer de constitution a été étudiée également. L'interprétation des résultats est ici plus complexe, puisque le fer existe sous deux états de valence, correspondant à deux états de coordinance. Il était impossible dans nos conditions expérimentales de distinguer les deux états du fer. On a néanmoins cherché à exploiter les résultats globaux, en considérant que le fer ferreux, n'appartenant en principe qu'à la couche octaédrique, devait passer en solution selon une cinétique identique à celle du magnésium.

Connaissant la teneur en fer ferreux de l'argile, il a été possible de la sorte de calculer les quantités de fer ferreux et ferrique passées en solution lors de l'attaque.

Il est évident que de tels résultats obtenus sur la base de calculs se prêtent assez mal à des interprétations cinétiques, de par le manque de précision qui s'attache aux valeurs numériques utilisées.

Nous avons essayé de généraliser les calculs selon LAUDELOUT et EECKMAN déjà utilisés pour le magnésium.

A cet effet si l'on pose :

a_0 : quantité initiale de l'élément fer présente dans le réseau;

a : quantité du même élément extraite au temps t.

On peut chercher à établir une relation du type

$$(a_0 - a) = k\,(t)^{1/p}$$

$$\frac{d\,(a_0 - a)}{dt} = \frac{k}{p}\,t^{\,1/p-1}$$

$$\text{or } t^{\,1/p} = \frac{a_0 - a}{k}$$

$$\text{d'où } \frac{\mathrm{d}\,(a_0 - a}{dt} = \frac{k^p}{p}\,(a_0 - a)^{\,1-p}.$$

La constante de vitesse « K » est alors définie par $K = \frac{k^p}{p}$

1° *Fer total.*

On utilise la relation $(a_0 - a) = k\,(t)^{1/p}$ mise sous la forme

$$\log\,(a_0 - a) = \log\,k + \frac{1}{p}\log\,t.$$

On constate que les valeurs expérimentales ne peuvent être traitées à l'aide des calculs précédents, les courbes représentatives de la fonction $\log\,(a_0 - a) = f\,(\log\,t)$ n'étant pas des droites (graphique 10).

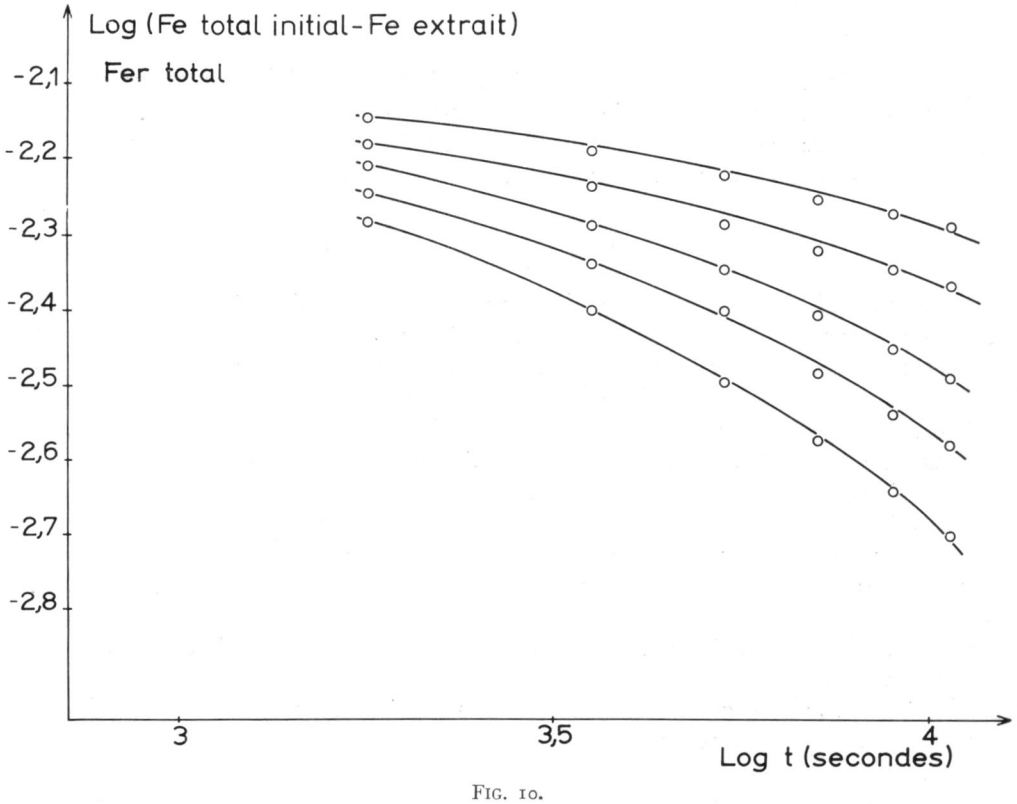


FIG. 10.

Ce résultat était quelque peu prévisible, puisque le fer total mis en solution correspond à la destruction de deux couches différentes dont les cinétiques de dégradation ne peuvent être à priori considérées comme analogues.

2° *Fer ferrique.*

Conformément à l'hypothèse précédemment introduite, on a calculé la quantité de fer ferrique extraite en supposant l'existence d'un rapport constant entre le magnésium et le fer ferreux provenant de la couche octaédrique.

En soustrayant cette dernière quantité calculée de la quantité de fer total dosée, on considère que l'on a déterminé le fer ferrique extrait.

Dans ces conditions on constate que les courbes représentatives des fonctions log (Fe^{+++} total — Fe^{+++} ext) = f (log t) forment un faisceau de droites, ce qui laisse supposer qu'on met ainsi en évidence une réaction unique (graph. 11).

Néanmoins, l'utilisation des constantes de vitesse déduites du graphique précédent, ne permet pas de calculer une énergie d'activation d'après la théorie d'Arrhenius. En effet le graphique log $k = f\left(\frac{1}{T}\right)$ (graph. 12) se présente comme une courbe dont la concavité est tournée vers le bas.

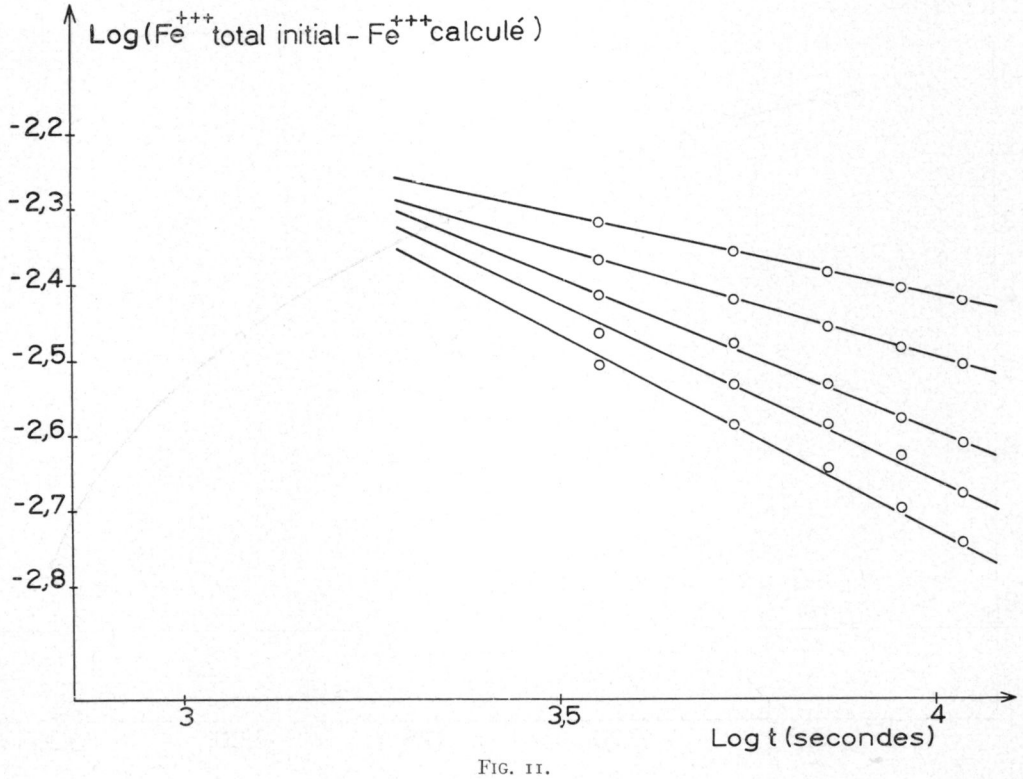


Fig. 11.

CONCLUSION

Cette étude de dégradation acide de la vermiculite nous a conduit à calculer l'énergie apparente d'activation de la couche octaédrique. La valeur de 19 K *cal/mole* déterminée d'après nos expériences est en excellent accord avec les résultats publiés par différents auteurs (Gastuche 1960, Laudelout 1958, Osthaus 1955, 1956) lors d'études similaires sur des matériaux de structure variées (montmorillonite, hectorite, kaolinite, catalyseurs de cracking).

En ce qui concerne l'aspect cinétique proprement dit, il n'est pas possible d'introduire la notion d'ordre de réaction, puisqu'on ne s'intéresse en définitive qu'à des aspects particuliers de la réaction générale de dissolution acide du minéral. Les ordres que l'on calculerait seraient nécessairement des ordres partiels, sans signification.

Les quelques éléments rassemblés sur l'évolution de la surface B. E. T. du résidu de l'attaque, ne font pas apparaître la superposition de plusieurs phénomènes, ainsi qu'on aurait pu l'attendre du fait de l'existence de deux types de couches structurales dans le feuillet de l'argile.

La constance, pour différentes argiles, de l'énergie d'activation apparente de la couche octaédrique, suggère que le phénomène de dissolution de cette dernière ne sera jamais négligeable en conditions acides.

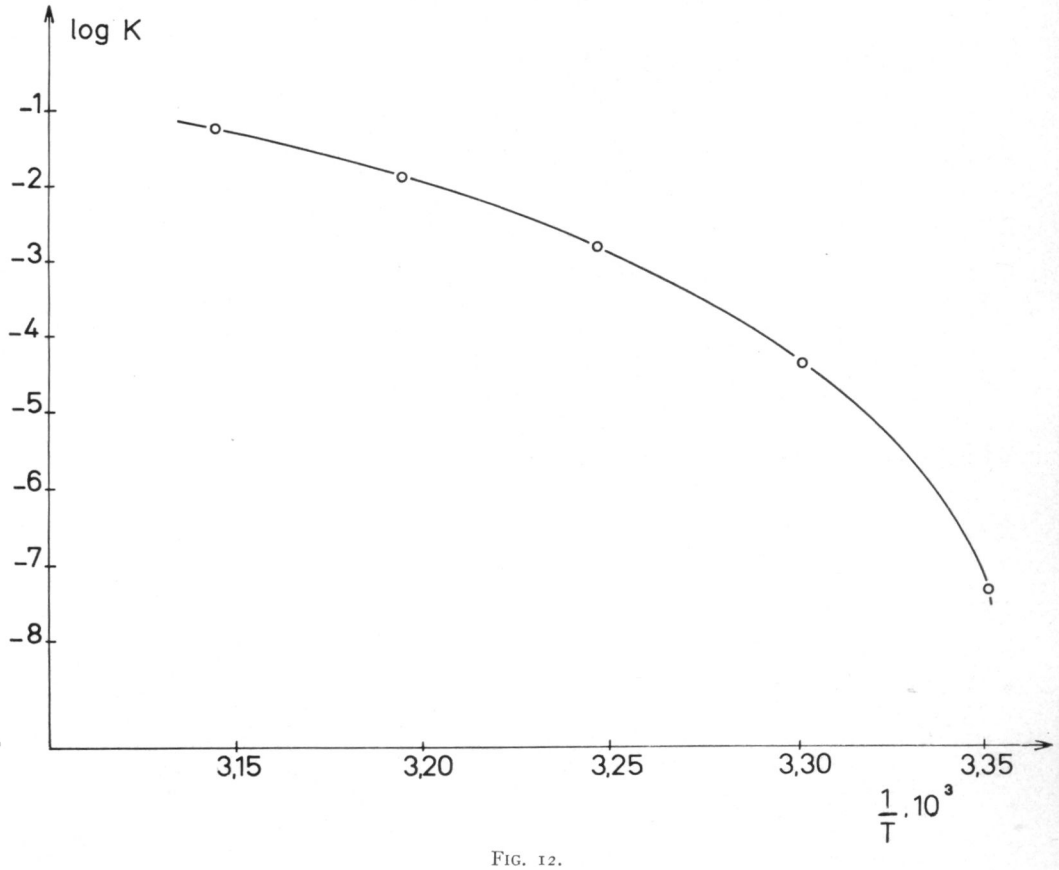


FIG. 12.

On peut prévoir que tout traitement acide destiné à « préparer » une argile au laboratoire, détruira en partie le réseau cristallin, l'effet étant d'autant plus rapide que le minéral est magnésien.

Il semble donc qu'il faille écarter toute opération abaissant le pH d'une suspension d'argile, sous peine d'en modifier la constitution.

Il est certain que dans un sol acide, une attaque analogue des minéraux argileux se produit. C'est là un phénomène connu, mais qu'on ne peut songer à discuter ici, du fait de la complexité introduite par la présence des hydroxydes et de la matière organique.

Reçu pour publication en janvier 1962.

SUMMARY

A KINETIC STUDY OF THE DISSOLUTION OF A VERMICULITE IN ACID

The kinetic attack of acid on a vermiculite is analysed by formulas of homogenous and heterogenous kinetics. The results led to the calculated value of 19 Kcal mole as the activating heat of destruction of the octahedral layer.

ZUSAMMENFASSUNG

DIE KINETIK DER SAUREN AUFLÖSUNG EINER VERMIKULIT

Die Kinetik der sauren Auflösung einer Vermikulit wird nach den Formeln der homogenen und hetergonen Kinetik untersucht. Die Ergebnisse ermöglichen die Berechnung einer Aktivierungshitze für die Zerstörung einer oktaedrischen Schicht von 19 Kcal/Mol.

Изучение кинетики растворения вермикулита кислотами.

Ж. ШОССИДОН и М. ВИЛЕН — Версаль.

Кинетика атаки вермикулита кислотой была проанализирована при помощи формул гомогенной и гетерогенной кинетики.

Результаты помогли исчислить теплоту активации разрушения октоэдрического слоя в 19 кг. кал./мол.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BRUNAUER S., 1951. The adsorption of gas and vapours. I. Physical adsorption. 511 p. *Oxford Univ. Press. London.*

GASTUCHE M. C., DELMON B., VIELVOYE L., 1960. La cinétique des réactions hétérogènes. Attaque du réseau silico-amuminique des kaolinites par l'acide chlorhydrique. *Bull. Soc. Chim. France*, **1**, 60.

LAUDELOUT H., EECKMANN J. P., 1958. La stabilité chimique des suspensions d'argile saturée par l'ion hydrogène. *C.R. 2e et 4e Commis. Ass. Internation Sci. Sol., Hambourg*, **2**, 194.

OSTHAUS B., 1955. Chemical determination of tetrahedral ions in nontronite and monmorillonite. *Clays and Clay minerals*, National Academy of Sciences, National research council, Publ. 327, 405.

OSTHAUS B., 1956. Kinetic studies on Montmorillonites an Nontronite by the and dissolution technique. *Clays and Clay minerals*, National Academy of Sciences ,National research council, Publ. 456, 301.

Ann. agron., 1962, **13** (1), 21-29.

631. 811. 2

ALIMENTATION PHOSPHORIQUE DES PLANTES ET PHÉNOMÈNES DE CONTACT RACINES — PARTICULES DE SOL

R. BLANCHET, Colette CHAUMONT et R. STUDER
Station agronomique, Châteauroux (Indre).

SOMMAIRE.

L'étude de l'intervention des phénomènes de contact racines-particules de sol dans l'alimentation phosphorique des plantes a été effectuée sur des sols synthétiques de constitution exactement connue, en maintenant constantes les compositions de leurs phases liquides et leurs teneurs en ions PO_4 adsorbés. Les phénomènes de contact jouent un rôle d'autant plus important que le pouvoir adsorbant des sols est plus élevé. Les conséquences de ces données quant à l'examen et à l'appréciation du pouvoir alimentaire des sols sont discutées.

INTRODUCTION

L'examen du niveau phosphorique de sols en bon état cultural, ne réagissant pas ou peu aux apports d'engrais phosphatés, conduit à une constatation très nette : les terres de faible pouvoir adsorbant renferment des solutions du sol relativement concentrées en P, assez comparables aux solutions nutritives constamment renouvelées assurant une bonne croissance en milieu liquide. Par contre, les concentrations en P des solutions de sols possédant un fort pouvoir adsorbant sont très faibles. et, sous forme de solutions coulantes, seraient insuffisantes pour assurer une croissance normale des végétaux (BLANCHET, 1959, *b*, *c*).

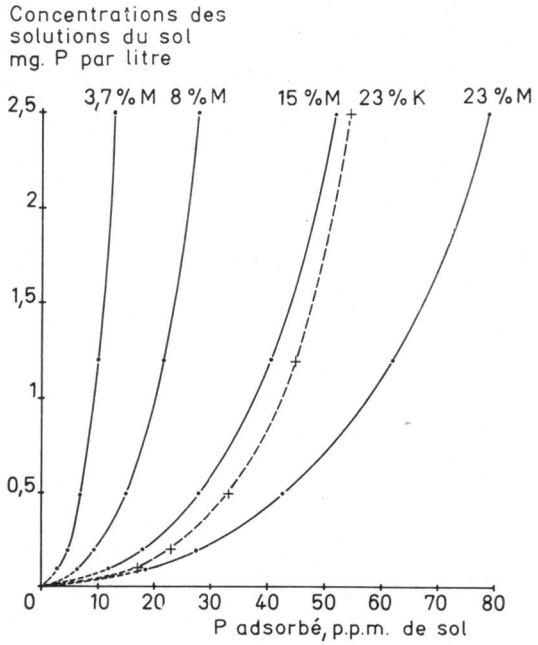
On peut donc penser que l'alimentation phosphorique des plantes ne s'effectue pas seulement aux dépens des ions PO_4 de la solution du sol, mais également par contact plus ou moins direct entre les racines et les particules colloïdales de sol retenant des « essaims » d'ions PO_4 adsorbés. C'est la théorie des phénomènes de contact, exposée par JENNY (1953). Cette conception n'est cependant pas partagée par tous les auteurs (FRIED et SHAPIRO, 1961, SISSINGH, 1961).

Afin d'éclairer ce problème, nous avons examiné l'alimentation phosphorique

des plantes dans des sols synthétiques de pouvoirs adsorbants croissants, renfermant des quantités connues et croissantes d'ions PO_4 adsorbés. Les teneurs en P de leurs phases liquides et solides étaient maintenues constantes grâce à la percolation continuelle de solutions nutritives de concentrations en P également croissantes.

TECHNIQUES EXPÉRIMENTALES

Cette expérience s'étant avérée délicate à réaliser, nous exposerons de façon détaillée les techniques utilisées.



Graphique 1. — Concentration en P des solutions du sol en fonction des quantités de P adsorbées, dans les divers milieux de culture — M : Montmorillonite ; K : Kaolinite.

1 — *Préparation et composition des milieux.*

Ceux-ci étaient constitués par des mélanges d'argiles et de quartz broyé à grains assez grossiers (diamètre 2 à 4 mm). Les argiles étaient préparées par les techniques habituelles : lavage par HCL dilué, puis par l'eau, dispersion par NaOH à pH 8,5, décantations, floculation par HCL dilué, et contact avec $CACL_2$ pour les amener à l'état calcique convenable. Il s'agissait de Montmorillonite de Camp-Bertaux et de kaolinite des Eyzies.

Les courbes d'adsortion de P par ces deux argiles ont ensuite été étudiées, afin d'établir les relations entre les quantités de P adsorbées et les concentrations en P des solutions à l'équilibre. Les divers milieux ont enfin été constitués, par addition d'argiles au quartz dans les proportions suivantes : Montmorillonite : 0 (quartz pur) ; 3,6 % ; 8 % ; 15 % ; 23 % d'argile ; Kaolinite : 23 % d'argile soit une capacité d'échange de cations identique à celle du milieu renfermant 3,7 % de Montmorillonite, et une surface externe des particules voisine de celle du milieu à 23 % de Montmorillonite.

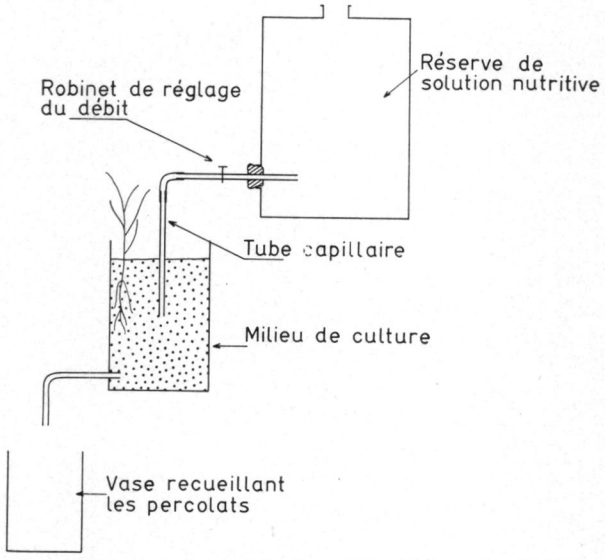
Les capacités d'échange T variaient de 41,5 à 269 méq/kg. Les échantillons ont été enrichis en K (K/T = 0,04), Mg (Mg/T = 0,1), oligo-éléments, et amenés à pH 6,8. Puis ces échantillons ont été divisés en lots de 1 kg ; ces lots ont reçu des quantités de phosphore telles que les solutions d'équilibre, c'est-à-dire les solutions du sol, renferment : 0,1 ; 0,2 ; 0,5 ; 1,2 ; 2,5 mg P par litre (graphique 1). Cet apport a été effectué sous forme de solution de KH_2PO_4, les milieux se trouvant à l'état pâteux. Après un léger séchage, ceux-ci ont été placés dans des récipients en matière plastique possédant un conduit d'évacuation à la partie inférieure.

2 — *Conduite de l'expérience.*

Afin de parfaire les conditions d'équilibre sol-solution du sol, ces milieux ont été percolés pendant quelques jours par des solutions nutritives de composition identique à celle des solutions des sols, selon le dispositif représenté sur le graphique 2, en contrôlant qu'il n'y ait pas de modification appréciable de ces solutions au cours du passage à travers la phase solide. La composition de ces solutions était la suivante :

$Ca(NO_3)_2$: 4 méq par litre ;
K_2SO_4 : 1 méq par litre ;
$Mg(NO_3)_2$: 2 méq par litre ;
KH_2PO_4 : q.s. pour obtenir 0,1 ; 0,2 ; 0,5 ; 1,2 ; 2,5 mg P par litre.

Acidité : telle que l'argile ne cède ni ne retienne des quantités appréciables de cations, de sorte que le pH soit maintenu à 6,8. A cet effet, les solutions ont été réalisées environ 0,0001 N en H_2SO_4 dans les milieux argileux, et 0,00002 N dans les milieux sableux.



Graphique 2. — Schéma du dispositif expérimental utilisé.

Après la mise à l'équilibre, 1,5 g de graines de *Lolium italicum*, soit environ 1000 graines, ont été semées à la surface des mélanges argile-sable, et recouvertes par 100 g de quartz grossier. Deux coupes successives de ray-grass ont été effectuées (technique de CHAMINADE, 1960).

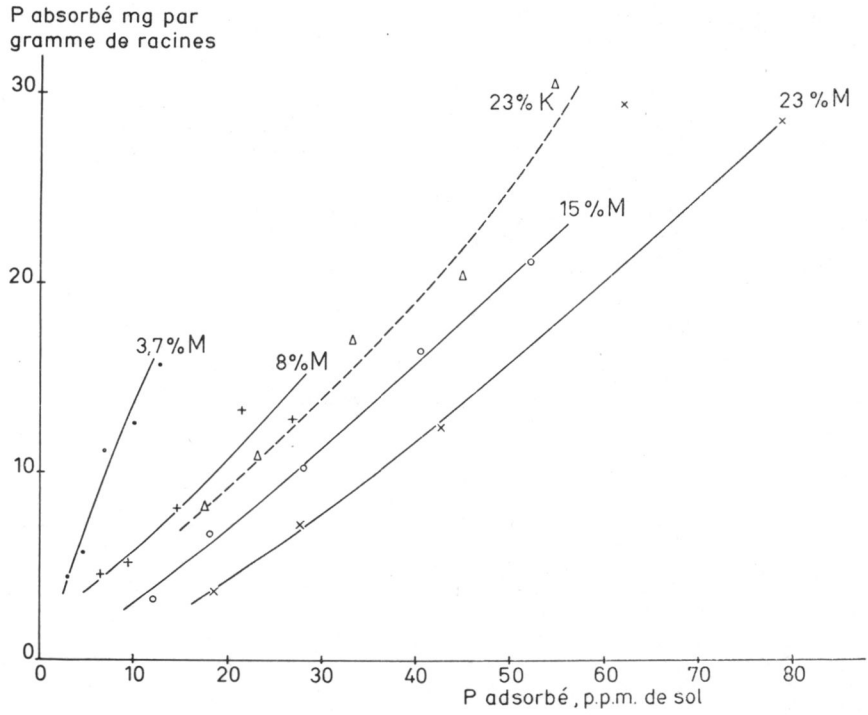
Le débit des solutions nutritives était de l'ordre de 1,5 litre par 24 heures, et d'autant plus fort que les plantes se trouvaient en période de croissance plus active. La concentration en P des solutions recueillies à la sortie des pots était dosée tous les deux jours environ, afin de contrôler qu'elle ne diffère pas notablement de la concentration initiale. Au cours des périodes de croissance les plus actives, nous avons été amenés à augmenter un peu les concentrations initiales prévues, afin que celles-ci se trouvent effectivement réalisées au contact des racines ; sous peine d'engorgement des milieux argileux, le débit ne pouvait en effet être accru dans de trop fortes proportions. Ainsi, pour une concentration prévue de 0,5 mg/l P, nous avons dû introduire 0,7 mg/l P dans les solutions initiales, les percolats renfermant environ 0,3 mg/l P. Les quantités de P absorbées par les plantes représentent sensiblement ce supplément de P apporté par les solutions nutritives ; dans l'ensemble, les plantes se sont donc bien alimentées dans les conditions prévues de stock d'ions PO_4 adsorbés et de concentrations des solutions du sol.

La présence du quartz grossier et l'agrégation appréciable qui s'était produite lors de la dessiccation modérée précédant la mise en culture ont assuré une perméabilité et une aération satisfaisante des milieux.

Enfin, des témoins cultivés sur sable pur et percolés avec des solutions dépourvues de P ont permis de déterminer les quantités de phosphore provenant des graines de ray-grass.

RÉSULTATS

Les résultats sont indiqués par les graphiques 3 et 4, qui représentent, en fonction des diverses caractéristiques du milieu, les quantités de phosphore absorbées par les plantes. Les valeurs sont exprimées en mg de P absorbés par gramme de racines, le développement de celles-ci ayant été un peu variable, et dans l'ensemble plus abondant dans les milieux pauvres en phosphore. Cette représentation donne aux résultats plus d'homogénéité, et l'interprétation reste identique.

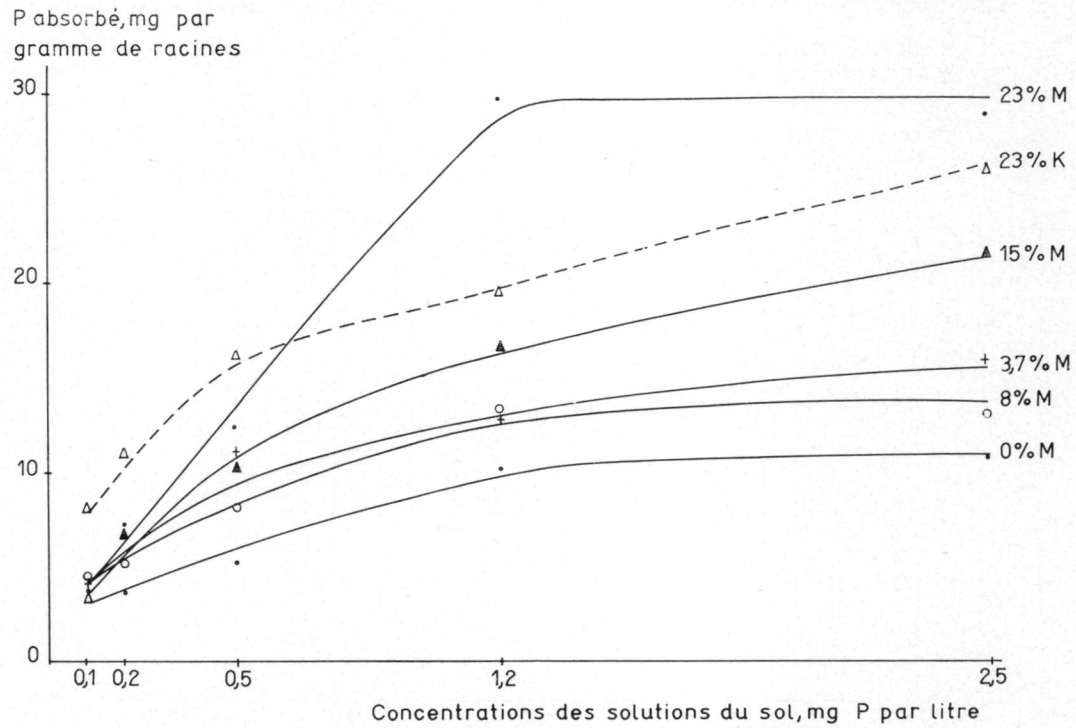


Graphique 3. — Quantités de phosphore absorbées par les plantes en fonction des teneurs des divers sols en P adsorbé. M : Montmorillonite ; K : Kaolinite.

Le graphique 3 montre que, pour un stock donné d'ions PO_4 adsorbés, l'alimentation a été d'autant meilleure que les sols étaient moins argileux ; de même, une alimentation donnée a été assurée par un stock de P d'autant plus grand que le pouvoir adsorbant du sol était plus élevé. Ces faits sont connus : lorsque le pouvoir adsorbant augmente, les réserves phosphorique doivent être de plus en plus importantes pour assurer l'alimentation des plantes. Ce graphique montre donc le pouvoir de rétention de l'argile à l'égard des ions PO_4.

Le graphique 4, qui représente les quantités de P absorbées en fonction de la concentration des solutions du sol, fait au contraire apparaître un effet favorable de l'argile sur l'alimentation. En effet, l'accroissement des teneurs en argile

provoque, pour une même concentration, une très forte augmentation de l'alimentation. Inversement, une même alimentation est assurée par des solutions du sol d'autant plus diluées que les sols sont plus argileux, à la condition, naturellement, que le stock d'ions PO_4 adsorbés soit suffisant. La plante ne s'alimente donc pas, dans ces conditions, uniquement à partir des ions PO_4 présents dans la solution du sol, mais également à partir des « essaims » d'ions PO_4 adsorbés, d'autant plus nombreux que la teneur en adsorbants est plus grande. Il s'agit bien là de l'intervention



Graphique 4. — Quantités de phosphore absorbées par les plantes en fonction de la concentration des solutions du sol, dans les milieux de teneurs croissantes en argile. M : Montmorillonite ; K : Kaolinite.

des phénomènes de contact racines-particules de sol, tels que les a envisagés JENNY. La comparaison des milieux renfermant O et 23 % d'argile montre que le rôle de ces phénomènes de contact est considérable.

D'autre part, les résultats obtenus sur la Kaolinite indiquent que cet effet est imputable à la surface externe des particules d'argile, facilement accessible aux racines, et non à leur surface interne ou à leur capacité d'échange.

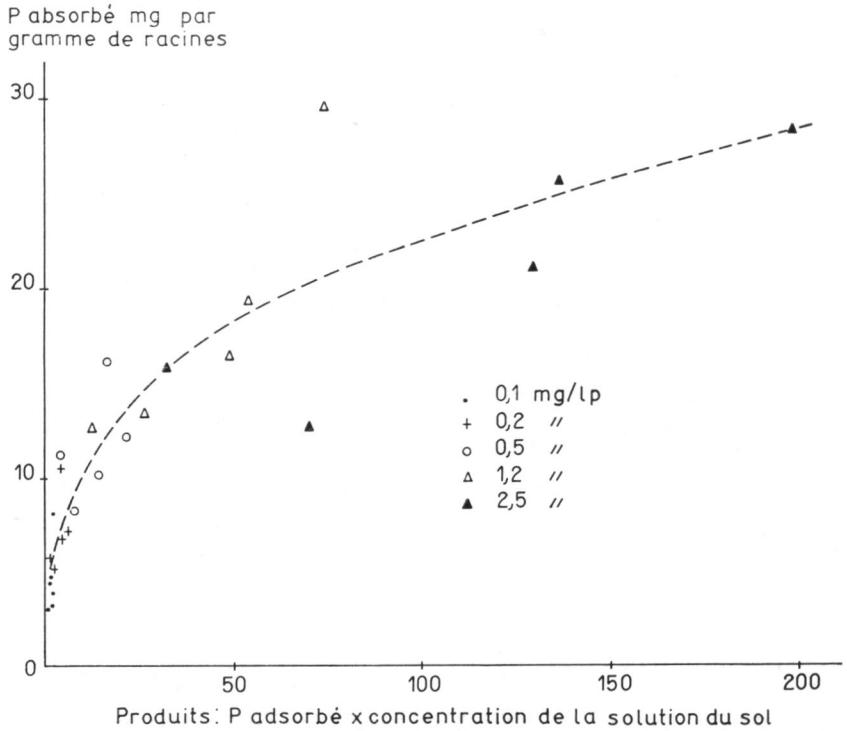
DISCUSSION.

Les adsorbants du sol, constitués ici par les argiles, exercent donc deux effets opposés :

— en retenant les ions PO_4, ils entrent naturellement en concurrence avec la plante quant à la cession de ces ions (graphique 3) ;

— en concentrant ces ions à leur surface, ils favorisent l'alimentation, qui ne s'effectue pas exclusivement à partir de la solution du sol. Remarquons d'ailleurs que la solution du sol n'est probablement pas aussi bien définie qu'il semble à première vue, puisque cette phase liquide représente tous les intermédiaires entre les films d'eau dans lesquels se trouve l'atmosphère ionique entourant les particules colloïdales, et la solution relativement homogène qui remplit les fins capillaires.

Les mécanismes qui entrent en jeu dans l'alimentation phosphorique dépendent donc beaucoup du pouvoir adsorbant du sol : lorsque celui-ci est faible, les végétaux



Graphique 5. — Quantités de phosphore absorbées par les plantes en fonction du produit : (P adsorbé ppm de sol X mgr /lP dans la solution du sol).

absorbent principalement les ions PO_4 de la phase solution ; lorsque la teneur en adsorbants est élevée, les contacts racines-adsorbants favorisent au contraire l'alimentation à partir des « essaims » d'ions PO_4 adsorbés, à la condition, naturellement, que ceux-ci soient suffisamment abondants.

Pour l'ensemble des sols, il est ainsi nécessaire de considérer à la fois les deux facteurs : le stock d'ions PO_4 adsorbés, et la concentration de la solution du sol. C'est ce qu'indique le graphique 5, sur lequel les quantités de P absorbées sont portées en fonction du produit :

(ppm. P adsorbées par le sol X concentration de la solution du sol).

On constate que cet indice, dont nous avons déjà utilisé une forme voisine, rend assez bien compte de l'alimentation phosphorique (BLANCHET, 1957, 1959) : les points relatifs aux différents milieux se fondent sensiblement autour d'une courbe moyenne.

Nous n'avons pas tenu compte ici de la mobilité des ions PO_4, qui ne présentait pas de grandes variations, les adsorbants étant homogènes (BLANCHET, 1959 *a*). Ce facteur devrait néanmoins être considéré dans les sols naturels, où plusieurs adsorbants se trouvent réunis.

Signalons enfin que, dans les milieux riches, ces jeunes plantes ont accumulé du phosphore sans que la matière sèche produite augmente aussi fortement que l'alimentation phosphorique. Dans les conditions expérimentales réalisées, la production maximum de matière sèche était sensiblement atteinte dans les milieux argileux pour une concentration des solutions du sol voisine de 0,1 à 0,2 mg par litre. Elle augmentait par contre jusqu'à 2,5 mg/lP dans les sols sableux.

CONCLUSION.

Comme le laissait prévoir l'examen de divers types de sols, les phénomènes de contact racines-particules de sol jouent un rôle important dans l'alimentation phosphorique des plantes. Ils sont liés à la présence dans le sol d'adsorbants concentrant autour d'eux les ions PO_4. La valeur du concept de solution du sol paraît ainsi diminuée ; cependant, l'examen de cette donnée présente un intérêt certain, car la concentration en P de la solution du sol est un indice du potentiel électrochimique des ions PO_4 dans le système sol-solution (SCOTT RUSSEL et *al.*, 1957 ; BLANCHET, 1959, *b*).

L'examen approfondi du pouvoir alimentaire du sol doit tendre à apprécier l'ensemble des facteurs intervenant dans l'alimentation phosphorique : stock d'ions PO_4 adsorbés, concentration de la solution du sol, pouvoir adsorbant (DEMOLON, BOISCHOT et LAJON, 1953), et éventuellement mobilité des ions PO_4. L'application de ces données aux études de fertilisation fera l'objet de publications ultérieures.

Reçu pour publication en janvier 1962.

SUMMARY

PHOSPHORUS NUTRITION OF PLANTS AND CONTACT PHENOMENA : ROOTS-SOIL PARTICLES

The various factors affecting the phosphorus nutrition of plants were studied by using synthetic media of known composition, containing increasing amounts of clay and adsorbed PO_4 ions. The composition of the soil solution from these soils was maintained constant by means of continual percolation with nutrient solutions in equilibrium with the adsorbants. These fulfilled a double role :

(*i*) by fixing the PO4 ions, they competed with plant in respect of the release of these ions (graph 3) and

(*ii*) by concentrating the PO_4 ions on their surface, they promoted nutrition provided the store of adsorbed PO_4 ions was sufficient.

The absorption of phosphorus by plants proceeds, in addition to the uptake of ions dissolved in the soil solution, by a more or less direct contact of roots with the soil particles. The importance of these contact phenomena increases with the adsorbing power of the soil (graphes 1 and 4). The combined factors intervening in the phosphorus nutrition, such as the store of adsorbed PO_4 ions, concentration of the soil solution, adsorbing power and mobility of PO_4 ions, have all to be taken into consideration in assessing the nutrient-supplying capacity of soils.

ZUSAMMENFASSUNG

PHOSPHORAUFNAHME DURCH DIE PFLANZE UND KONTAKTERSCHEINUNGEN ZWISCHEN WURZELN UND BODENTEILCHEN

Das Studum der verschiedenen Faktoren der Phosphoraufnahme durch die Pflanze erfolgte auf synthetischen Nährboden mit bekannter Zusammensetzung, und zunehmendem Inhalt an Tonen und adsorbierten PO_4-Ionen. Die Zusammensetzung dieser Bodenlösungen wurde durch fortwährende Sickerung der Nährlösungen im Gelichgewicht mit den Adsorbanten konstant gehalten.

Diese erfüllen eine doppelte Rolle :

— indem sie die PO_4-ionen festhalten, treten sie in Konkurrenz mit der Pflanze wegen Abgabe dieser Ionen.

— indem sie diese Ionen and der Oberfläche konsentrieren, evorteilen sie die Ernährung, bunter der Bedingung dass die Reserve der adsorbierten PO_4-Ionen genügend sei. Die Phosphoraufnahme durch die Pflanze geschieht nicht allein von den in der Bodenlösung befindlichen Ionen aus, vielmehr durch mehr oder weniger direkte Fühlung der Wurzeln mit den Bodenteilchen. Die Bedeutung dieser Fühlung nimmt mit dem Adsorbtionsvermögen der Böden zu (Abb. 1 und 4).

Die Gesamtheit der in die Phosphorernährung eingreifenden Faktoren muss für die Beurteilung des Nährvermögens der Böden in Betracht gezogen werden : Reserve der adsorbierten PO_4-Ionen, Konzontration der Bodenlösungen, Adsorbtionsvermögen, Beweglichkeit der PO_4-Ionen (Abb. 5).

Фосфорное питание растений и феномены соприкосновения корней с почвенными частицами.

Р. БЛАНШЕ, С. ШОМОН и Р. СТЮДЕР — Шатору.

Изучение различных факторов фосфорного питания растений было проведено в синтетической среде известного состава, содержавшей увеличивающиеся дозы глины и адсорбированных ионов PO_4.

Неизменный состав раствора этих почв поддерживался в равномерном соотношении с адсорбированными веществами благодаря постоянному поступлению питательных растворов.

Адсорбированные вещества играют двоякую роль :

— удерживая ионы PO_4 они вступают конкуренцию с растением в отношении возврата этих ионов (таблица 3).

— концентрируя ионы на своей поверхности и при условии достаточности запаса адсорбированных ионов PO_4, они улучшают питательный режим растений.

Фосфор всасывается растениями не только исходя от ионов почвенного раствора, но также и в результате более или менее тесного соприкосновения корней с мелкими частицами почвы. Значение этих феноменов соприкосновения увеличивается по мере увеличения адсорбционных способностей почв (таблица 1 и 4).

Все факторы участвующие в фосфорном питании растений должны быть в целом приняты во внимание при определении питательной способности почв : запасы адсорбированных ионов PO_4, концентрация почвенных растворов, адсорбционные способности почв, подвижность ионов PO_4 (таблица 5).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.

BLANCHET R., 1957. Relations entre la vitesse de dilution isotopique du phosphore du sol et l'alimentation phosphatée des plantes. *C.R. Acad. Sci.*, 2739-2741.

BLANCHET R., 1959 *a*. Energie d'adsorption de divers ions par des argiles pures. *Ann. Agron.*, **10**, 5-52.

BLANCHET R., 1959 *b*. Nutrition minérale des plantes, activités ioniques et énergies d'adsorption. *Ann. agron.*, **10**, 267-307.

BLANCHET R., 1959 *c*. Pouvoir adsorbant des divers constituants du sol à l'égard des ions phosphoriques et examen des réserves des terres. *C. R. Acad. Agric.*, **45**, 247-252.

CHAMINADE R., 1960. Expérimentation en petits vases de végétation ; types d'essais pour tester l'efficacité des engrais humiques. *Ann. agron.*, **11**, 131-134.

DEMOLON A., BOISCHOT P., LAJON J., 1953. Réaction des divers sols à l'apport des engrais phosphatés solubles. *Ann. agron.*, **4**, 291-330.

FRIED M., SHAPIRO R. E., 1961. Soil plant relationships in ion uptake. *Annu. Rev. Plant Physiol.*, **12**, 91-112.

JENNY H., 1953. In Truog E, *Mineral Nutrition of Plants*, 107-132. Univ. Wisconsin Press.

SCOTT RUSSELL R., RUSSELL E. W., MARAIS P. G. 1957. Factors affecting the ability of plants to absorb phosphate from soils *J. Soil Sci.*, **8**, 248-267.

SISSINGH H. A., 1961. Rapport entre les constituants phosphatés du sol et l'alimentation phosphatée des plantes. *Bull. Doc. Assoc. Int. Fabr. Super.*, **30**, 3-10.

Ann. agron., 1962, **13** (1), 31-53.

632. 122. 1 : 546. 56

CONTRIBUTION A L'ÉTUDE DE LA TOXICITÉ DU CUIVRE DANS LES SOLS

G. DROUINEAU et Rose MAZOYER
Station d'Agronomie et de Physiologie végétale,
Centre de Recherches agronomiques de Provence, Antibes (Alpes-Maritimes).

SOMMAIRE

Rappel des données actuelles sur l'accumulation du cuivre dans les sols cultivés.
Étude de l'influence du pH sur la toxicité du cuivre pour des plantes annuelles dans une expérimentation en pots.
Influence de la toxicité du cuivre sur la composition des plantes cultivées.
Conséquences pour l'Agriculture, en particulier dans le cas de la reconversion de sols de vignobles.

INTRODUCTION

Dès 1895, Aimé GIRARD, après VIALA et VERMOREL, s'était préoccupé des risques d'accumulation du cuivre dans les sols à la suite des traitements anticryptogamiques estimant à 15 kg par hectare la moyenne des quantités de sulfate de cuivre apportées annuellement, il avait entrepris d'essayer des applications en solutions de 1 500 kg de sulfate de cuivre par hectare sur des parcelles d'expériences, apport correspondant à 100 ans de traitement. Sur les témoins comme sur les parcelles traitées, Aimé GIRARD avait cultivé blé, avoine, trèfle, betterave, pommes de terre, et différents légumes, et poursuivi les essais pendant trois ans. Il avait conclu comme VIALA et comme VERMOREL « que, d'une manière générale, l'accumulation dans le sol d'une quantité considérable de cuivre n'apporte aucun trouble à la végétation et à la production des plantes cultivées ».

Mais c'est à MAQUENNE et DEMOUSSY (1919) que l'on doit la première étude sur le cuivre accumulé dans les sols cultivés par le fait de l'homme. Ces auteurs ont adopté une méthode d'extraction conventionnelle (attaque à l'acide sulfurique à 10 p. 100 à l'ébullition pendant 1/2 heure) et examiné 140 échantillons de terre provenant de différentes régions de France. Dans tous les cas, les terres de vignobles renferment

plus de cuivre que celles qui sont soumises aux assolements normaux. Alors que ces dernières renferment moins de 20 milligrammes par kilo et le plus souvent aux environs de 4 à 5, on trouve de 50 à 200 milligrammes par kilo dans les terres de vignobles ayant reçu des traitements anticryptogamiques pendant des temps plus ou moins longs, l'apport annuel étant estimé à 15 kg de cuivre métal par hectare et par an.

MAQUENNE et DEMOUSSY avaient déjà constaté la rétention superficielle du cuivre, qui ne descend pas dans le sous-sol. Ils avaient conclu à l'insolubilisation de ce métal, et en inféraient qu'il n'y avait aucun risque à son accumulation.

Ces auteurs avaient donc la même opinion qu'Aimé GIRARD qui, en 1895, avait conclu à l'inocuité complète du cuivre introduit dans le sol à dose massive jusqu'à 1500 kg à l'hectare (en sulfate).

29 ans après, A. MICHEL (1948) a repris la question de l'enrichissement en cuivre des sols de vignobles. Cet auteur dose le cuivre total après calcination et attaque à l'acide sulfurique à 10 p. 100. Les sols étudiés sont les sols calcaires de Champagne et surtout ceux de Bourgogne. Les teneurs relevées dans la couche superficielle (0 à 10 cm) sont considérables et varient de 124 à 458 milligrammes par kilo. Elles baissent fortement dans la couche sous-jacente (de 20 à 90 milligrammes par kilo) et sont souvent insignifiantes à 50 cm. A. MICHEL considère que des symptômes de « court noué » sont plus fréquents dans les vignobles dans lesquels la zone radiculaire est enrichie en cuivre. Les apports de sulfate de cuivre en Bourgogne, depuis 1910, sont estimés à 75 kg par hectare et par an, soit 3 tonnes pour la période considérée. Le cuivre est resté en totalité dans le profil et l'auteur considère que la continuation de l'enrichissement des sols en cuivre risque de présenter des inconvénients.

ANNE et DUPUIS apportèrent, en 1953, d'utiles données complémentaires obtenues dans le vignoble alsacien. Dans les sols de ce vignoble le cuivre total varie de 58 à 183 milligrammes par kilo dans la couche arable des sols non calcaires. Dans un sol calcaire de Riquewihr il atteint même 401 milligrammes par kilo. Les quantités de cuivre apportées avec les traitements antiparasitaires sont estimées, par ces auteurs, à 10 ou 15 kg par hectare, ce qui correspondrait à un enrichissement annuel de la couche arable de 4 à 5 milligrammes par kilo.

ANNE et DUPUIS ont également étudié la toxicité du cuivre dans des cultures en pots sur blé, orge, seigle, luzerne, trèfle, moutarde, œillette et vigne. La toxicité est très marquée pour les graminées en sol acide à partir de 200 mg kg. La vigne n'est affectée qu'à partir de 400 mg/kg. D'après ces auteurs les caractères de la toxicité du cuivre sont les suivants : faible surface de feuilles, longueur réduite des tiges et des rameaux, développement limité du système radiculaire, absence de tallage chez les graminées. Pour les teneurs élevées, les plantes restent naines. Dans les terres calcaires la toxicité du cuivre est beaucoup moins marquée. On peut diminuer celle-ci dans les sols acides en utilisant du carbonate de calcium.

En 1953 (DROUINEAU et MAZOYER), nous avons, nous-mêmes publié les résultats des études effectuées en 1952 dans le sud-est de la France. Nous avions, en effet, constaté des accidents de végétation dus à la toxicité du cuivre se manifestant sur des plantes annuelles après la défriche de plantations d'arbres fruitiers.

Les symptômes de toxicité qui s'étaient manifestés sur des cultures maraîchères (épinards) et sur des cultures florales (glaïeuls) étaient limités à des bandes situées à l'emplacement des lignes de pêchers arrachés l'année précédente. Ces bandes avaient une largeur de 2 à 3 mètres.

L'analyse des sols, en ce qui concerne le cuivre échangeable (acétate d'ammonium à pH 7) et le pH (eau), avait donné les résultats suivants :

	Cu échangeable (acétate d'ammonium à pH 7) mg par kg de terre sèche	pH
	—	—
Cultures de glaïeuls :		
Sains	110	6,2
Malades	130	4,5
Cultures d'épinards :		
Sains	80	5,9
Malades	98	4,7

Nous avions donc été amenés à conclure que dans toute la zone couvrant l'ancien verger il y avait eu une accumulation de cuivre en provenance des traitements et que la toxicité du cuivre s'était manifestée dans les bandes où le pH avait sensiblement baissé. On sait qu'une telle baisse de pH ne peut être attribuable qu'à un usage continu de soufre, de bouillies sulfocalciques ou d'engrais acidifiants comme le sulfate d'ammoniaque. Nous avions précisé également le caractère superficiel de la fixation du cuivre même dans ce type de sol.

En 1955, DEPARDON et BURON ont étudié les mauvais développements de certaines plantes cultivées et notamment des céréales sur défriche de vigne. Ces auteurs, employant la même méthode d'extraction que MICHEL (acide sulfurique à 10 p. 100), ont trouvé des quantités de cuivre atteignant plus de 300 mg par kilo dans un sol calcaire anciennement en vignes. Dans les sols acides, les teneurs sont en général plus faibles. DEPARDON et BURON considèrent, cependant, que le cuivre n'est pas responsable des accidents constatés et incriminent surtout l'approvisionnement insuffisant en matières organiques et en azote ainsi que l'acidification dans les sols de vignoble.

En 1956 (DROUINEAU et MAZOYER), nous avons présenté au Congrès international de la Science du Sol, les premiers résultats d'une étude systématique sur la toxicité du cuivre en fonction du pH du sol, à égalité de teneur en cuivre échangeable et pour des teneurs variables. Cette étude précise et confirme certains des résultats de ANNE et DUPUIS. La toxicité du cuivre augmente quand le pH baisse pour des teneurs en cuivre « échangeable » couramment rencontrées dans les sols de vigne.

En 1959, DELAS et *al.* ont donné quelques indications sur les teneurs en cuivre « échangeable » extractible à l'acétate d'ammonium dans les sols du Bordelais. Dans la couche superficielle des sols de vignoble la teneur en cuivre échangeable varie de 50 à 200 mg -kg. Même dans les sols sableux acides, le cuivre se fixe superficiellement, ce qui confirme ce que nous avions déjà observé dans le sud-est de la France.

La même année, ANDRÉ relatait les résultats préliminaires d'une étude de la toxicité du cuivre observée sur blé après défrichement de vignes sur les terrasses de la Moyenne Vallée de la Garonne (25 p. p. m. de Cu échangeable dans un sol à pH 4).

En 1959, également, XUEREFF donnait quelques indications sur les observations effectuées dans la Vallée de l'Eyrieux en liaison avec la Station d'Agronomie d'Antibes qui a effectué les dosages de cuivre échangeable. Il s'agissait de sols très acides (pH 4 à 5) sur des roches mères variées (grès, micaschistes, alluvions récentes). On

constatait une chlorose de pêchers (sur Franc) dans des sols où la teneur en cuivre échangeable s'élevait à 30 p. p. m. dans les sous-sols. Aucune chlorose ne se manifestait dans les mêmes sols, à des pH aussi bas, quand le sol ne renfermait que des teneurs en cuivre inférieures à 6 p. p. m. Quand on remonte le pH du sol d'une unité avec de la chaux et surtout du sous-sol avec de l'urée ou par injection avec un lait de chaux, les symptômes de chlorose disparaissent et la végétation s'améliore.

Voyons maintenant ce qui concerne les travaux faits à l'étranger sur ce sujet :

C'est tout d'abord le cuivre originaire de régions cuprifères qui a permis de constater des phénomènes de toxicité. Ainsi FORBES (1917) a étudié dans l'Arizona les conséquences de l'utilisation des eaux provenant d'une zone de mines de cuivre.

Beaucoup plus tard, DUVIGNEAUD et DENAEYER de MET (1960) ont étudié l'action du cuivre et d'autres métaux lourds sur la végétation dans le Haut Katanga. Les espèces résistantes au cuivre pullulent par suite de l'élimination toxique des espèces concurrentes. Les sols peuvent renfermer quelques grammes de cuivre par kilo, mais il s'agit de cuivre total.

REUTHER et SMITH ont signalé, en 1952, qu'un nombre croissant de vergers d'agrumes de Floride, établis sur des sols sableux bien draînés, prenaient un aspect chlorotique. Ces auteurs ont constaté que dans ces sols acides (pH voisin de 5) la chlorose des agrumes était en relation avec la teneur en cuivre du sol pouvant dépasser 200 p. p. m (cuivre total). Cette accumulation dans les vergers commerciaux est le résultat de l'utilisation d'engrais complets renfermant du cuivre. Ces apports, institués pour lutter contre les carences de ce métal qui se sont manifestées dans les sols de cette région, sont de l'ordre de 10 à 25 kg par hectare auxquels s'ajoutent de 5 à 15 kg par hectare de cuivre des fongicides. La teneur en cuivre total, faible dans les sols vierges, augmente avec l'âge des vergers et la plus grande partie du cuivre se retrouve dans les 15 premiers centimètres.

Les relations entre le pH, le type de sol et la toxicité du cuivre pour les jeunes plants d'agrumes ont été ensuite précisées par REUTHER, SMITH et SCUDDER en 1953. Ces auteurs indiquent la possibilité de remédier à la toxicité par le chaulage et insistent sur le fait que la toxicité ne se manifeste pas toujours dans les vieux vergers, une grande partie des racines étant, en profondeur, en dehors de la zone enrichie en cuivre.

Ils indiquent également que les symptômes de chlorose ferrique ne sont pas toujours associés avec la toxicité du cuivre.

Notons qu'en 1952, GILBERT dans une mise au point de « Advances in Agronomy » sur le cuivre dans la nutrition, considérait comme impossibles des manifestations de la toxicité du cuivre dans les conditions normales de l'agriculture.

En 1957, en Allemagne de l'Ouest, GARTEL donne quelques indications sur la teneur en cuivre des sols de la Vallée de la Moselle, bien que les sols les plus importants renferment moins de 50 p. p. m., on relève par place des concentrations toxiques de 200 à 400 p. p. m.

En 1958, au Kenya, GIBSON signale des dégâts dans les pépinières forestières de *Pinus patula* par suite de l'utilisation de préparations à base d'oxyde de cuivre pour lutter contre la fonte des semis. Ces dégâts se manifestent en sols acides et sont attribués à la toxicité du cuivre qui altère complètement les systèmes radiculaires des jeunes plants.

En 1961, HIRST, LE RICHE et BASCOMB constatent des enrichissements anor-

maux en cuivre de la couche superficielle (10 premiers centimètres) de sols de vergers de pommiers du Cambridgeshire (Angleterre), les teneurs en cuivre, pour un mode d'extraction non précisé, atteignent 150 p. p. m dans cette couche et même 1 500 p. p. m dans la litière de débris organiques de 2 cm. d'épaisseur qui la recouvre. Cet enrichissement est attribué aux traitements à la bouillie bordelaise pratiqués depuis 15 ans, les sols des environs présentant des teneurs inférieures à 40 p. p. m.

Enfin, en 1961 également, TASCHENBERG, MACK et GAMBRELL ont étudié les teneurs en cuivre d'un vignoble de l'État de New York pour lequel il existait des données précises sur les traitements de 1946 à 1957.

La teneur normale des sols non traités est de 40 p. p. m. (attaque acide non précisée). Cette teneur atteint 100 p. p. m après 6 ans de traitements dans une couche superficielle de 9 cm. Au bout de 11 ans, elle atteint 138 p. p. m. pour les prélèvements effectués dans la raie, et 97 p. p. m. au milieu des interlignes. Entre 9 et 18 cm de profondeur la teneur n'augmente que pour 11 ans de traitements. Il s'agit d'un limon graveleux se lessivant facilement dont le pH n'a pas été précisé. Les quantités moyennes de cuivre sont de l'ordre de 10 kg. par hectare et par an.

De l'ensemble de ces observations se dégagent les points suivants :

1° Il y a eu incontestablement accumulation de cuivre dans les sols de vignobles et de vergers surtout à la suite de traitements anticryptogammiques.

2° Les phénomènes de toxicité se manifestent surtout en sol acide.

Il était donc important de préciser quelles sont les quantités à partir desquelles la toxicité du cuivre se manifeste aux différents pH, sur quelques plantes annuelles qui peuvent éventuellement être cultivées après des arrachages de vigne, ceci en considérant les teneurs en cuivre échangeable correspondant à la zone de concentration que l'on rencontre le plus souvent dans les sols de vigne et de verger non calcaires.

MÉTHODE EXPÉRIMENTALE ET MATÉRIEL UTILISÉ

Nous avons procédé à un certain nombre de cultures en pots drainés, en polyéthylène, avec un sol sableux de type lessivé dérivé de gneiss.

Au départ, l'analyse du sol était la suivante :

Analyse chimique :

pH (eau)	5,2
Azote total pour mille	0,71
Acide phosphorique facilement assimilable pour mille (méthode Truog)	traces
Potassium échangeable p. 1 000	0,07
Calcium échangeable p. 1 000	0,63
Magnésium échangeable p. 1 000	0,13
Cuivre échangeable exprimé en p.p.m.	traces
Manganèse échangeable exprimé en p.p.m.	traces
Capacité d'échange à pH 7 : 7,5 m.e. pour 100 g de sol.	

Analyse physique :

Argile p. 100	7,5
Limon p. 100	7,4
Sables fins p. 100	24,5
Sables grossiers p. 100	57,5

D'importantes parties aliquotes du stock ont été ajustées par chaulage ou acidification sulfurique aux pH (eau) : 7 - 6 - 5 - 4, et laissées en stock.

Le cuivre a été rajouté sous forme de sulfate en solution et mélangé très soigneusement à la terre de chaque série de pots.

Cinq cultures ont été effectuées dans les conditions suivantes :

1° Lupin blanc :
Cu : 0-20-50-100-200 p. p. m. (durée 70 jours)
pH : 4-5-6-7

2° Lupin blanc :
Cu : 0-20-50-100-200 p. p. m. (durée 50 jours)
Mn : 0-10-20-30 p. p. m.
pH : 5 et 6

3° Maïs :
Cu : 0-20-50-100-200 p. p. m (durée 30 jours).
Mn : 0-10-20-30 p. p. m.
pH : 5 et 6

4° Haricots nains :
Cu : 0-20-50-100-200 p. p. m (durée 25 jours).
Mn : 0-10-20-30- p. p. m.
pH : 5 et 6.

5° Tomates :
Cu : 0-20-50-100-200 p. p. m. (durée 80 jours)
Mn : 0-10-20-30 p. p. m.
pH : 5 et 6.

Les quatre variations d'apports de manganèse ont été envisagées pour pouvoir, sinon étudier éventuellement une interaction, ce qui n'était pas statistiquement possible, tout au moins pour éviter de se trouver dans une situation de carence en Mn et déceler un déséquilibre Mn-Cu manifeste.

Les dosages de cuivre dans les sols et dans les plantes ont été effectués d'abord avec la méthode classique à la dithizone avec extraction au tétrachlorure de carbone. Nous avons employé ensuite la méthode à la bis-cyclohexanone oxalyldihydrazone (MAZOYER, 1958).

Le poids frais a été déterminé immédiatement après coupure des plantes au collet. Le poids sec a été obtenu après séchage, aux infrarouges jusqu'à poids constant. Les racines ont été extraites par lavage à l'eau, mais l'état du système radiculaire n'a pas permis de les récupérer quantitativement.

L'étude de la toxicité du cuivre impose des cultures de courte durée en raison de l'exagération avec le temps des différences entre les traitements et la mort des plantes les plus atteintes.

D'autre part, pour limiter autant que faire se peut l'influence du cuivre sur la vie microbienne et sur l'alimentation en azote des cultures, celles-ci ont été alimentées par des apports d'une solution nutritive très riche en azote minéral et renfermant 17 m. e. d'N mi-nitrique mi-ammoniacal, 1,5 m. e. par litre de PO_4, et 1,9 m. e. de K. Les quantités apportées étaient par jour de l'ordre de 50 mg d'N, 1,25 mg de P et 5 mg de K.

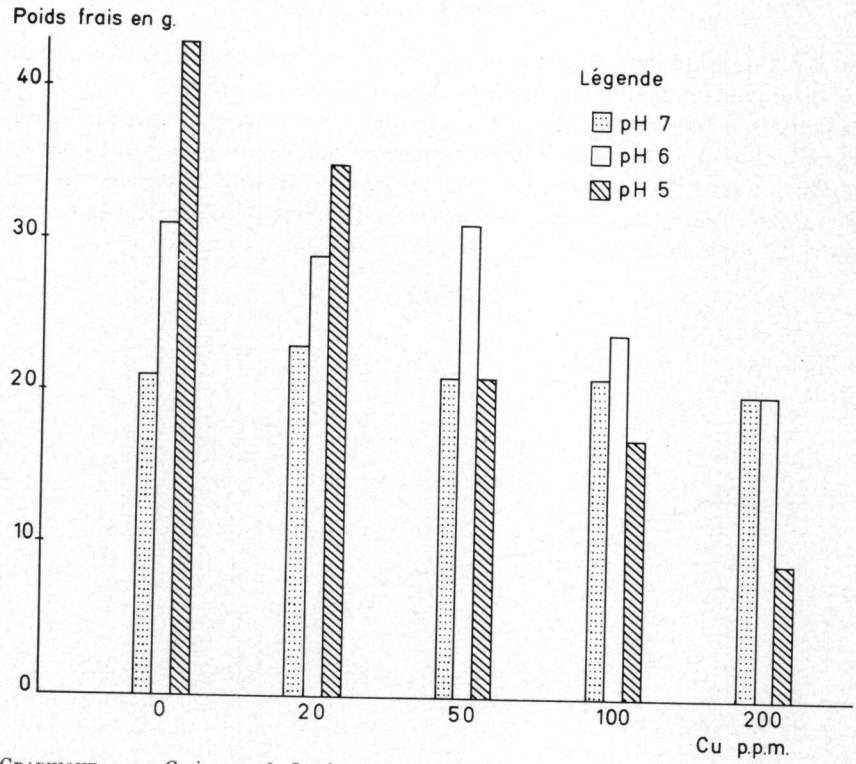
Le pH et les teneurs en Cu échangeable ont été vérifiés avant culture, après stabilisation des mélanges, et après culture. Après culture, les différences de pH n'ont pas dépassé 0,3 unités et les variations de Cu échangeable 10 p. 100.

RÉSULTATS

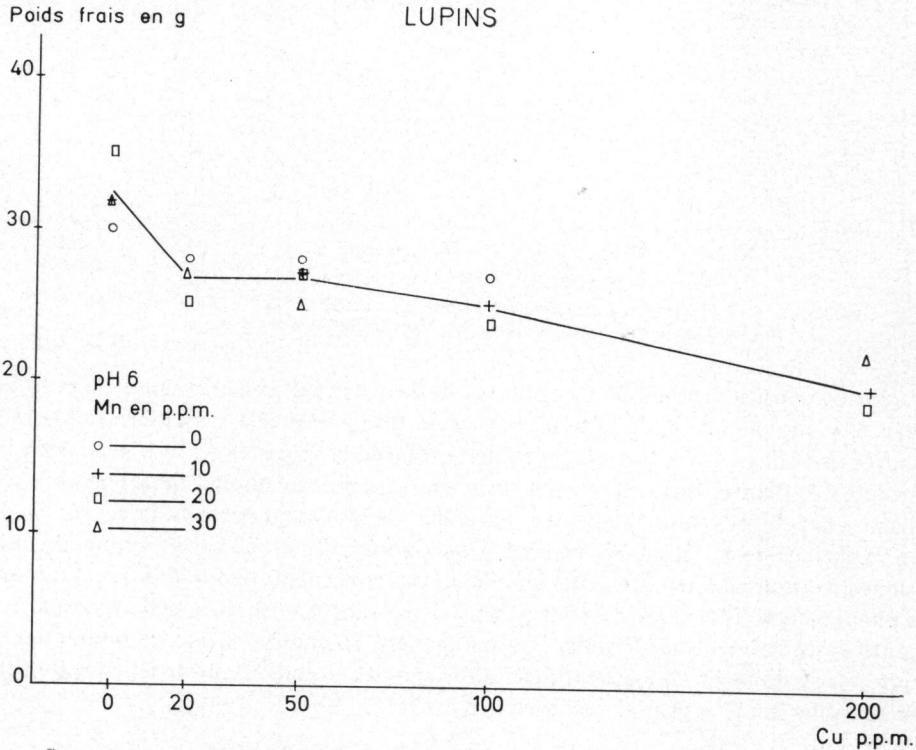
CROISSANCE ET COMPOSITION MINÉRALE DES PLANTES EN FONCTION DU pH ET DE LA TENEUR EN CUIVRE DU MILIEU DE CULTURE

Lupin : Première et deuxième culture

Le Lupin est une plante acidophile qui pousse plus mal à pH 7 que dans la zone acide. La toxicité du cuivre ne se manifeste pas à pH 7 même pour la plus forte concentration. La dépression de croissance commence à se manifester à la dose de 100



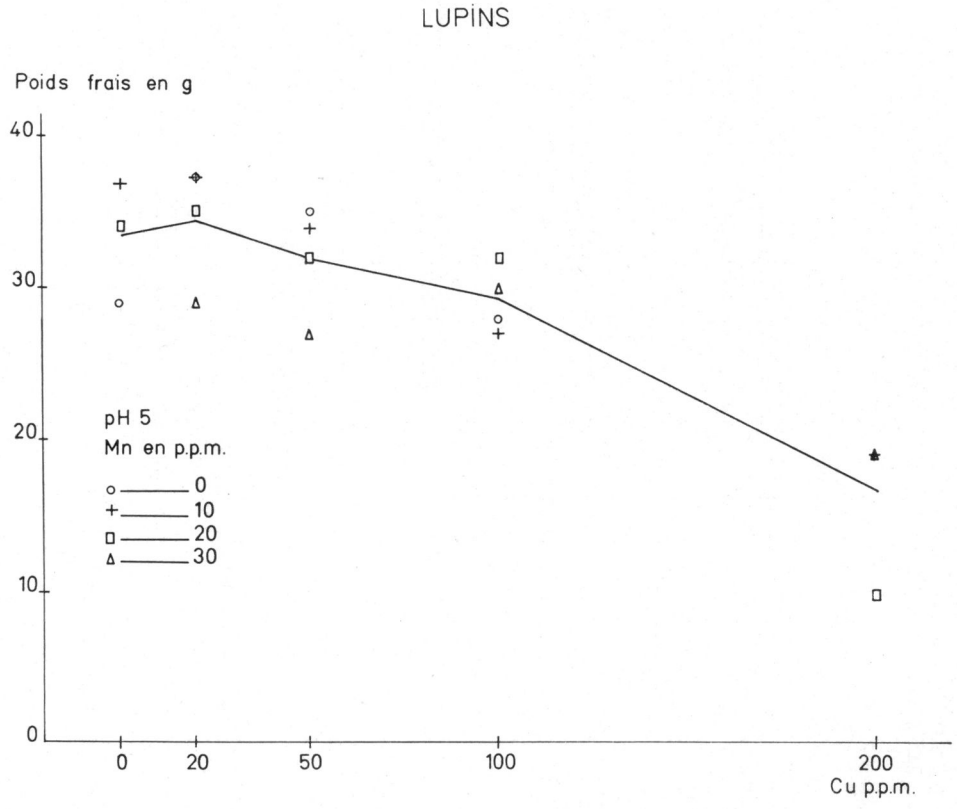
GRAPHIQUE 1. — *Croissance de Lupin en fonction de la teneur en cuivre du sol, à pH 5, 6 et 7*



GRAPHIQUE 2. — *Croissance de Lupin en fonction de la teneur en cuivre du milieu à pH 6. Moyenne de 4 traitements à teneur en Mn variant de 0 à 30 p.p.m.*

p. p. m. à pH 6 (graphique 1). Seule la dose de 200 est très toxique à pH 6. A pH 5, la toxicité augmente régulièrement avec les quantités de cuivre.

La deuxième culture a été faite aux pH 5 et 6 à des teneurs en manganèse variant entre 0 et 30 p. p. m. pour éviter les conséquences éventuelles d'une interaction Cu-Mn dans la zone des carences en manganèse. On voit que la toxicité du cuivre est surtout manifeste à partir d'une teneur en Cu de 100 p. p. m., à pH 5 la dose 200 p. p. m. est plus toxique qu'à pH 6 (graphiques 3 et 4).



GRAPHIQUE 3 — *Croissance de Lupin en fonction de la teneur en cuivre du milieu à pH 5. Moyenne de 4 traitements à teneur en Mn variant de 0 à 30 p.p.m.*

La composition minérale des plantes de la première culture figure dans le tableau 1. L'augmentation de la teneur en azote total, quand la toxicité se fait sentir, vient essentiellement du fait que la toxicité retarde la croissance ; non seulement on examine des plantes qui ne sont pas du même âge physiologique, mais encore il n'y a pas d'effet de dilution. On trouve, en effet, une augmentation de la teneur en P. Les variations de K, Ca et Mg ne sont pas caractéristiques. Le cuivre augmente avec la concentration en ions Cu^{2+} dans le milieu et la concentration en ions H^+, tant que les phénomènes de toxicité ne sont pas trop marqués. Le Lupin paraît absorber des quantités de cuivre considérables. Le manganèse augmente en même temps que le cuivre, mais de façon moins marquée, alors que les variations de teneur en Fe sont peu sensibles à pH 5 et 6 et incohérentes à pH 7.

TABLEAU I

Lupins — analyse chimique des parties aériennes
(Culture sans addition de manganèse)

pH	N°	Cu dans le sol en p.p.m.	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Cu	Mn
			p. 100 de matière sèche					p.p.m. de mat. sèche		
pH 7	1	0	4,82	0,21	1,51	2,10	0,32	155	120	206
	2	20	5,02	0,21	1,52	1,95	0,34	107	167	405
	3	50	4,85	0,18	1,49	2,06	0,33	205	200	293
	4	100	5,07	0,22	1,48	2,16	0,38	159	479	493
	5	200	5,12	0,24	1,16	2,28	0,48	282	435	849
pH 6	6	0	4,70	0,16	1,53	1,85	0,39	194	134	356
	7	20	4,59	0,17	1,56	1,73	0,44	223	387	412
	8	50	4,35	0,17	1,57	1,92	0,39	170	300	558
	9	100	4,72	0,21	1,17	2,20	0,52	158	676	600
	10	200	6,02	0,28	1,17	2,32	0,55	193	650	964
pH 5	11	0	5,19	0,16	1,95	2,62	0,53	169	149	729
	12	20	5,64	0,17	2,09	1,96	0,44	139	447	735
	13	50	7,04	0,28	2,07	2,37	0,67	143	621	969
	14	100	7,32	0,31	1,88	2,22	0,59	175	519	1 218
	15	200	8,27	0,45	1,76	1,55	0,59	—	575	1 550
pH 4	16	0	6,03	0,78	1,78	2,16	0,60	364	121	1 484

A pH 4, végétation trop malade : pas de récolte.

Maïs

Le Maïs est plus sensible à l'acidité et à la toxicité du cuivre que le Lupin. A pH 6 (graphique 4), la toxicité du cuivre est déjà sensible à partir de 50 p. p. m. La croissance diminue de moitié à 100 p. p. m., elle est très fortement inhibée à 200 p.p.m. quelle que soit la quantité de Mn présente dans le milieu entre 0 et 30 p.p.m.

A pH 5 (graphique 5), la toxicité du cuivre est encore plus marquée pour les doses 50, 100 et 200 p. p. m. ; ce fait est surtout sensible pour 100 p. p. m. de Cu.

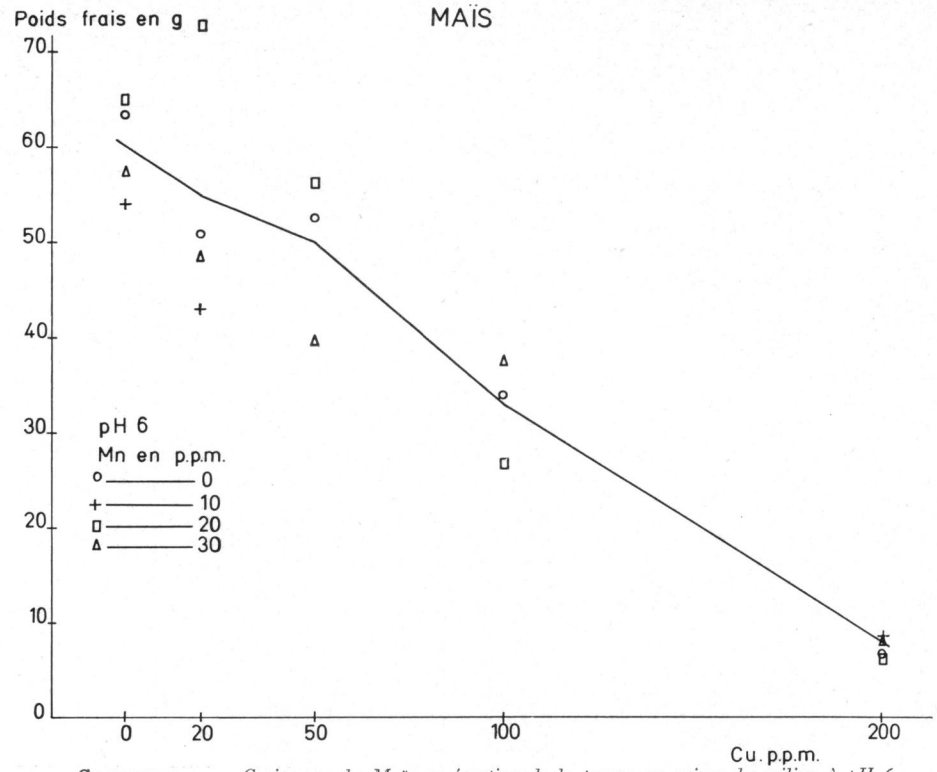
En ce qui concerne la composition des parties aériennes des cultures à pH 6 (tableau 2) on constate une augmentation de la teneur en azote total et en acide phosphorique surtout marquée pour la dose 200 p. p. m. de Cu (croissance très fortement inhibée). L'augmentation de la teneur en Ca et Mg est très fortement marquée surtout pour la dose Cu 200 p. p. m.

La teneur en potassium aurait, par contre, tendance à diminuer avec la toxicité du cuivre qui détériore le système radiculaire.

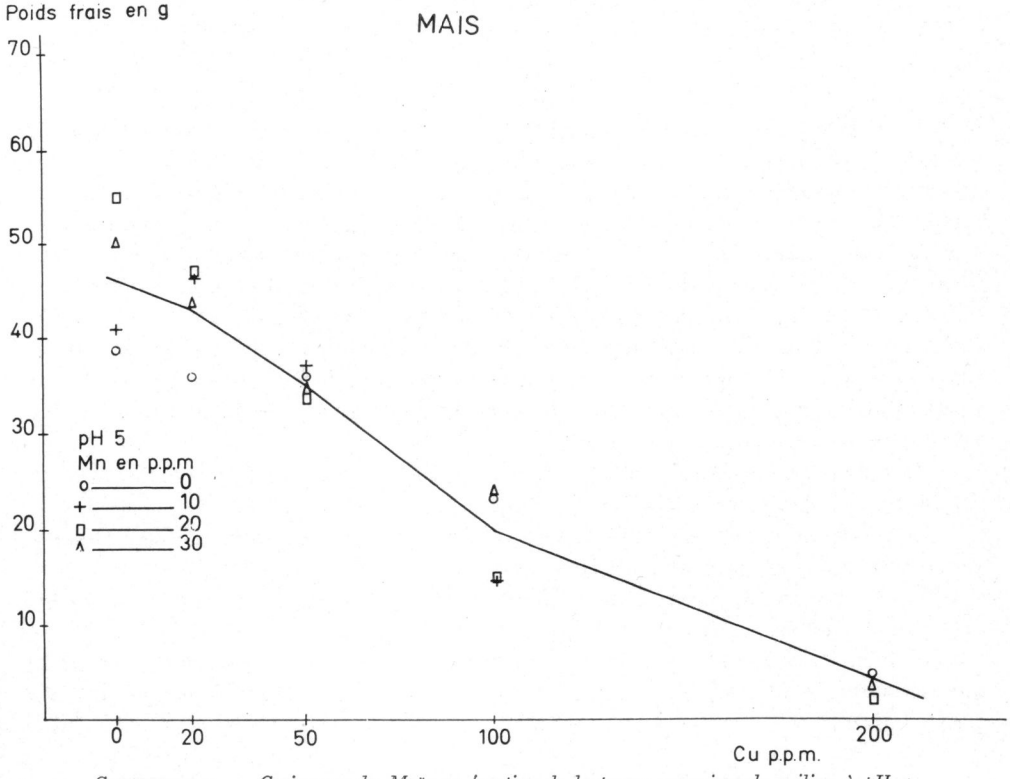
Le cuivre augmente dans la plante avec la dose apportée dans le milieu passant de 20 p. p. m. environ à plus de 200 p. p. m.

Le manganèse augmente dans la plante avec la quantité de manganèse apportée au sol et la teneur en cuivre du milieu.

On peut faire des observations analogues à pH 5 (tableau 3), la teneur en manganèse augmentant encore davantage dans les plantes dont la croissance est inhibée par le cuivre.



GRAPHIQUE 4. — *Croissance du Maïs en fonction de la teneur en cuivre du milieu à pH 6. Moyenne de 4 traitements à teneur en Mn variant de* 0 *à* 30 *p.p.m.*



GRAPHIQUE 5. — *Croissance du Maïs en fonction de la teneur en cuivre du milieu à pH 5. Moyenne de 4 traitements à teneur en Mn variant de* 0 *à* 30 *p. p. m.*

TABLEAU 2

Maïs — à pH 6

Analyse chimique des parties aériennes

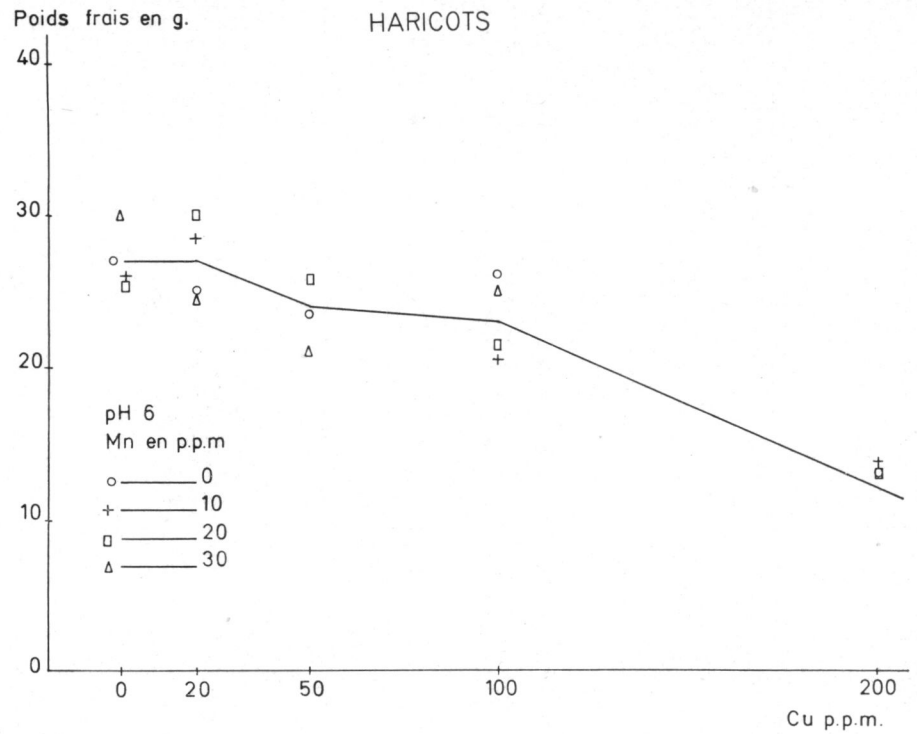
N°	Mn	Cu	N	P	K	Ca	Mg	Cu	Mn
	dans le sol en p.p.m.		p. 100 de matière sèche					p.p.m. de matière sèche	
1	0	0	5,03	0,18	3,44	0,84	0,49	21,6	traces
2	10	0	4,70	0,15	3,78	0,88	0,46	22,5	140
3	20	0	5,11	0,21	3,96	0,95	0,51	18,4	220
4	30	0	5,06	0,19	3,73	0,95	0,44	19,5	320
5	0	20	4,85	0,18	3,80	0,87	0,45	18,0	traces
6	10	20	4,54	0,16	3,78	0,83	0,45	17,0	220
7	20	20	4,96	0,21	3,84	0,94	0,51	15,0	440
8	30	20	5,05	0,18	3,52	0,91	0,54	15,0	500
9	0	50	5,04	0,21	3,98	0,95	0,54	35,0	traces
10	10	50	4,56	0,16	3,63	0,85	0,47	42,0	140
11	20	50	4,58	0,17	3,62	0,77	0,48	29,0	310
12	30	50	5,11	0,19	3,97	0,88	0,50	52,0	620
13	0	100	4,80	0,19	3,13	1,13	0,51	94,0	traces
14	10	100	4,57	0,17	3,29	0,97	0,51	136,0	410
15	20	100	5,28	0,20	3,25	1,19	0,60	130,0	480
16	30	100	4,84	0,19	3,35	1,09	0,50	94,0	640
17	0	200	6,03	0,30	3,07	2,06	0,94	231,0	traces
18	10	200	5,63	0,26	2,42	1,96	1,15	206,0	400
19	20	200	5,86	0,28	2,52	2,11	0,93	234,0	1 120
20	30	200	5,87	0,25	2,48	1,89	0,84	195,0	1 260

TABLEAU 3

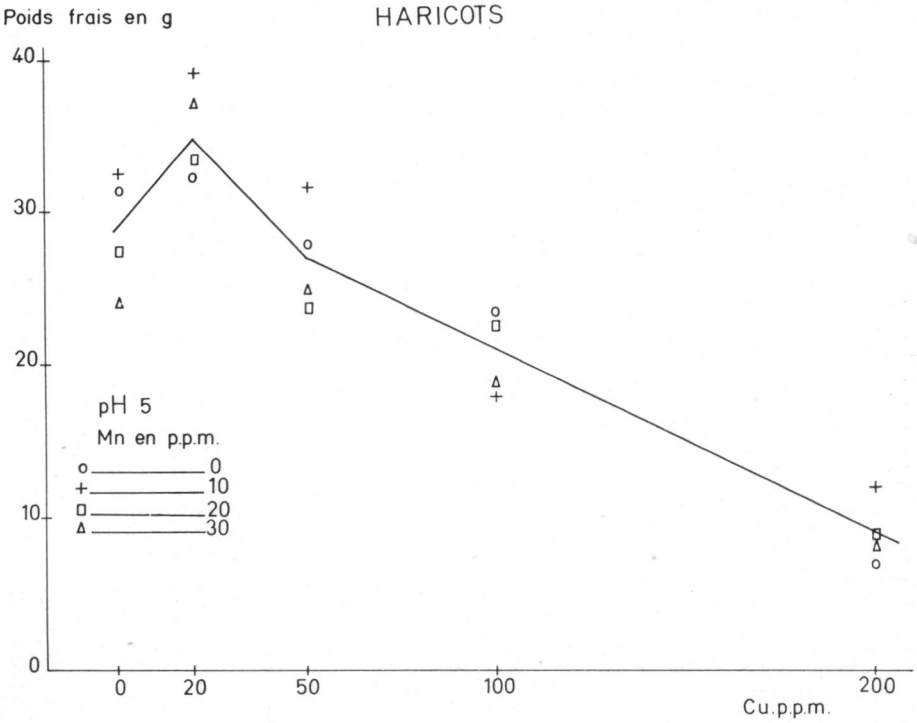
Maïs — à pH 5

Analyse chimique des parties aériennes

N°	Mn	Cu	N	P	K	Ca	Mg	Cu	Mn
	dans le sol en p.p.m.		p. 100 de matière sèche					p.p.m. matière sèche	
21	0	0	5,31	0,17	3,85	0,78	0,39	17	traces
22	10	0	5,39	0,15	3,68	0,79	0,44	23	360
23	20	0	4,07	0,19	3,71	0,78	0,44	23	450
24	30	0	5,46	0,18	3,62	0,81	0,41	17	580
25	0	20	5,54	0,20	4,12	0,78	0,44	40	traces
26	10	20	5,18	0,17	3,91	0,82	0,45	29	280
27	20	20	5,11	0,22	3,73	0,74	0,46	23	510
28	30	20	4,93	0,17	3,77	0,79	0,46	41	900
29	0	50	5,14	0,20	3,72	0,81	0,48	44	traces
30	10	50	5,00	0,19	3,45	0,80	0,44	51	290
31	20	50	5,01	0,16	3,40	0,90	0,51	51	560
32	30	50	4,92	0,17	3,42	0,88	0,48	58	860
33	0	100	5,40	0,24	3,21	1,18	0,56	116	traces
34	10	100	6,00	0,23	3,10	1,42	0,67	129	370
35	20	100	5,60	0,22	3,30	1,34	0,67	141	620
36	30	100	4,88	0,22	2,93	1,08	0,62	121	940
37	0	200	6,17	0,27	—	1,95	0,75	228	traces
38	10	200	5,92	0,24	—	2,17	0,86	161	230
39	20	200	6,32	0,28	—	2,09	0,75	236	770
40	30	200	6,34	0,25	—	1,55	0,99	230	1 630



GRAPHIQUE 6. — *Croissance du Haricot en fonction de la teneur en cuivre du milieu à p H6. Moyenne de 4 traitements à teneur en Mn variant de 0 à 30 p.p.m.*



GRAPHIQUE 7. — *Croissance du Haricot en fonction de la teneur en cuivre du milieu à pH 5. Moyenne de 4 traitements à teneur en Mn variant de 0 à 30 p.p.m.*

TABLEAU 4

Haricots — à pH 5

Analyse chimique des parties aériennes

N°	Mn	Cu	N	P	K	Ca	Mg	Cu	Mn
	dans le sol en p.p.m.		p. 100 de matière sèche					p.p.m. matière sèche	
1	0	0	5,90	0,42	4,38	1,39	0,36	12	91
2	10	0	5,88	0,39	4,17	1,26	0,42	16	246
3	20	0	6,17	0,40	4,10	1,38	0,50	10	520
4	30	0	6,47	0,47	4,17	1,25	0,46	17	722
5	0	20	6,22	0,35	4,20	1,49	0,45	28	79
6	10	20	6,20	0,35	3,88	1,49	0,47	28	356
7	20	20	6,57	0,43	3,65	1,60	0,51	29	468
8	30	20	5,97	0,38	4,07	1,32	0,51	29	828
9	0	50	6,54	0,35	3,64	1,69	0,51	40	80
10	10	50	6,52	0,37	3,74	1,50	0,54	43	318
11	20	50	6,14	0,40	4,05	1,40	0,41	43	615
12	30	50	6,58	0,51	4,28	1,61	0,42	45	760
13	0	100	6,85	0,46	3,86	1,73	0,56	37	82
14	10	100	7,77	0,43	3,38	1,53	0,61	54	581
15	20	100	7,68	0,49	3,52	1,74	0,66	45	364
16	30	100	6,97	0,44	3,43	1,74	0,70	59	910
17	0	200	9,90	0,60	2,67	2,28	0,78	71	95
18	10	200	9,09	0,61	3,18	1,85	0,64	78	386
19	20	200	9,12	0,55	2,88	1,95	0,74	93	700
20	30	200	8,09	0,48	2,92	2,19	0,67	69	1 050

TABLEAU 5

Haricots — à pH 6

Analyse chimique des parties aériennes

N°	Mn	Cu	N	P	K	Ca	Mg	Cu	Mn
	dans le sol en p.p.m.		p. 100 de matière sèche					p.p.m. matière sèche	
21	0	0	5,90	0,37	3,98	1,90	0,45	11	78
22	10	0	5,82	0,35	3,68	1,97	0,50	11	246
23	20	0	5,99	0,37	4,06	1,45	0,52	14	468
24	30	0	5,79	0,39	4,02	1,57	0,47	11	606
25	0	20	6,43	0,43	4,06	1,58	0,53	20	79
26	10	20	6,72	0,44	4,24	1,53	0,49	20	249
27	20	20	6,42	0,42	4,27	1,76	0,52	28	467
28	30	20	6,67	0,45	4,04	1,60	0,54	17	627
29	0	50	6,54	0,42	4,06	1,72	0,56	17	97
30	10	50	6,41	0,44	4,19	1,56	0,57	29	301
31	20	50	6,62	0,46	4,01	1,55	0,58	34	470
32	30	50	7,07	0,45	4,31	1,62	0,62	29	695
33	0	100	6,78	0,46	4,14	1,85	0,55	58	81
34	10	100	7,13	0,46	4,15	1,72	0,55	57	241
35	20	100	7,19	0,41	4,04	1,82	0,60	43	570
36	30	100	6,72	0,40	3,68	1,79	0,65	58	765
37	0	200	7,82	0,55	3,76	2,03	0,59	80	80
38	10	200	8,09	0,62	3,58	1,84	0,58	71	294
39	20	200	7,58	0,60	3,84	1,70	0,59	59	590
40	30	200	8,18	0,59	3,25	2,30	0,64	86	925

Haricots

A pH 6, le jeune plant de haricot n'est guère sensible à la toxicité du cuivre que pour des concentrations élevées (200 p. p. m.) (graphique 6).

A pH 5, l'effet toxique est plus marqué et se manifeste déjà à 100 p. p. m. (graphique 7).

La composition chimique est indiquée dans les tableaux 4 et 5. Ici encore, on constate une augmentation de la teneur en azote total et en phosphore. La teneur en potassium diminue pour les fortes doses de cuivre à pH 5. Le calcium et le magnésium augmentent pour les fortes doses de cuivre surtout à pH 5. Il y a d'autant plus de cuivre dans la plante que le milieu est plus riche en cet élément surtout à pH 6 pour les fortes doses. La teneur en manganèse augmente avec la teneur en Mn du milieu, elle est d'autant plus élevée que le pH est plus bas.

TABLEAU 6

Tomates — à pH 6

Analyse chimique des parties aériennes

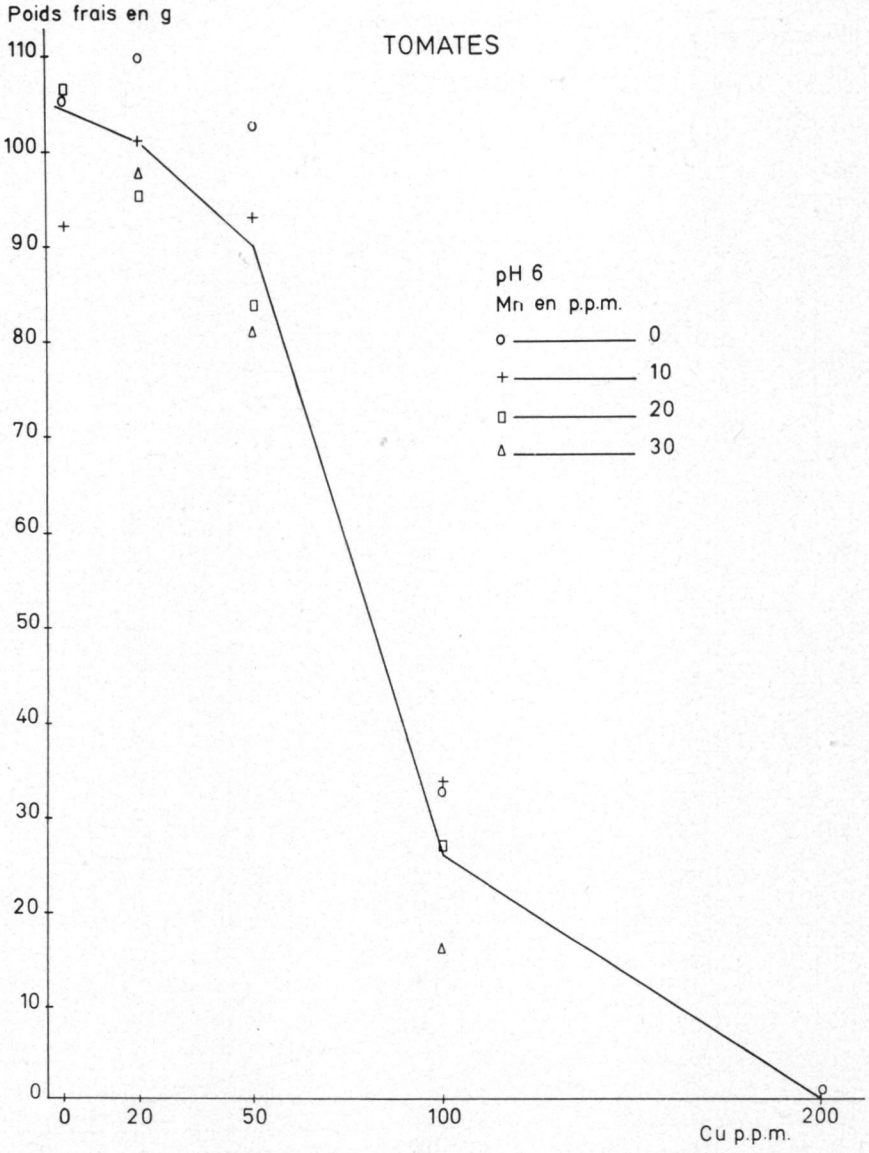
N°	Mn	Cu	N	P	K	Ca	Mg	Cu	Mn	Fe
	dans le sol en p.p.m.		p. 100 de matière sèche					p.p.m. de matière sèche		
21	0	0	4,67	0,33	2,64	1,54	0,71	5,7	110	213
22	10	0	5,12	0,34	3,58	1,43	0,79	4,6	314	252
23	20	0	4,70	0,28	3,70	1,44	0,67	4,3	450	230
24	30	0	4,73	0,24	3,82	1,43	0,61	4,3	636	212
25	0	20	4,83	0,29	4,06	1,34	0,57	17,4	108	223
26	10	20	4,74	0,27	3,71	1,46	0,45	14,6	222	212
27	20	20	5,33	0,32	4,14	1,32	0,62	28,7	522	224
28	30	20	5,00	0,25	3,92	1,38	0,60	11,4	547	203
29	0	50	4,98	0,24	4,15	1,22	0,64	35,0	99	388
30	10	50	4,80	0,25	4,00	1,79	0,61	28,0	247	213
31	20	50	4,95	0,26	4,30	1,93	0,61	22,7	597	182
32	30	50	5,10	0,24	4,17	2,02	0,69	22,4	950	177
33	0	100	6,15	0,28	4,22	2,64	0,88	40,1	515	223
34	10	100	4,67	0,18	2,76	2,45	0,86	34,3	210	189
35	20	100	5,17	0,18	3,13	2,88	0,96	11,5	937	193
36	30	100	5,27	0,17	2,32	3,40	0,93	15,4	680	127

Tomates

La Tomate paraît beaucoup plus sensible à la teneur en cuivre du sol. La dose 100 p. p. m. est très toxique aux deux pH et inhibe davantage la croissance à pH 5 qu'à pH 6. La dose 200 p. p. m. empêche toute croissance à pH 5 comme à pH 6. La croissance de la Tomate est déjà sensiblement entravée pour la dose 50 p. p. m. à pH 5. Les analyses n'ont pu être faites pour les doses 200 p. p. m., faute de matériel.

On constate également sur les tomates une légère augmentation de la teneur en azote, corrélative de l'inhibition de la croissance pour la dose de 100 p. p. m.

Par contre, le phosphore aurait tendance à diminuer. La potasse est assez variable et, si la diminution de K des tissus pour la dose 100 p. p. m. est assez nette à

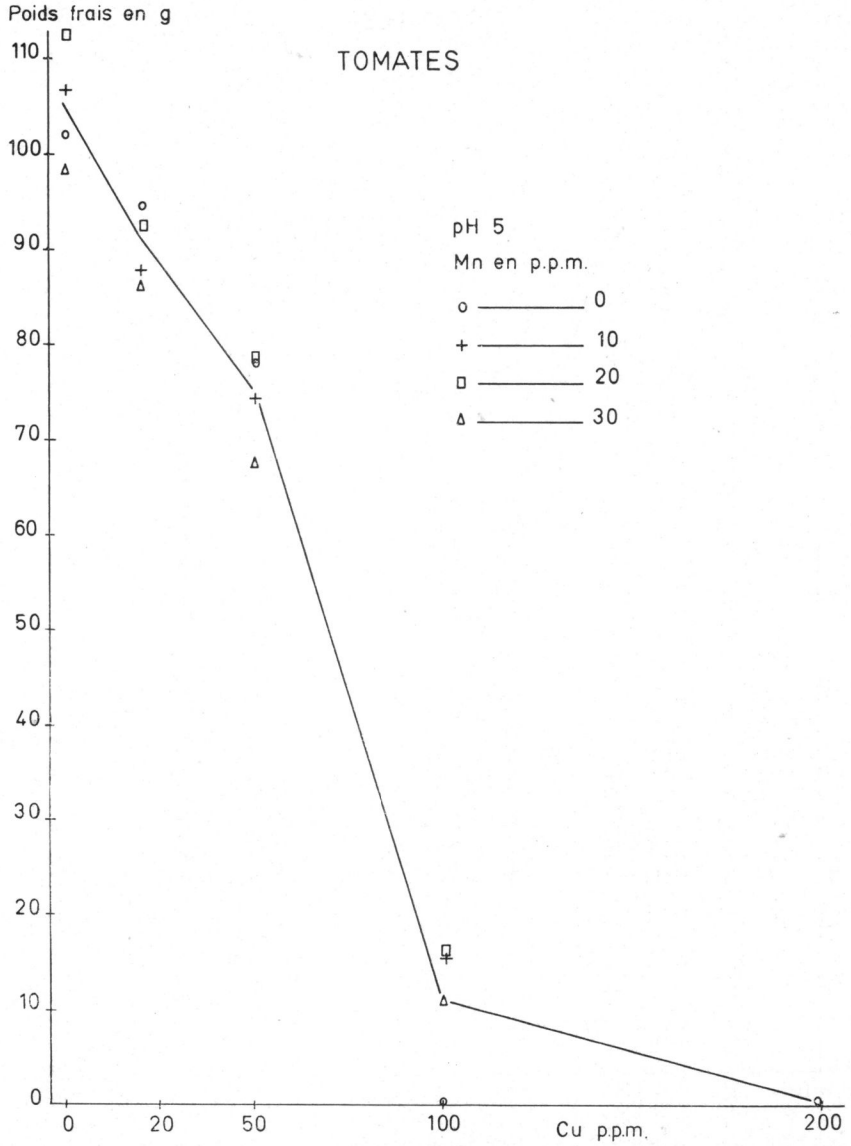


GRAPHIQUE 8. — *Croissance de la Tomate en fonction de la teneur en cuivre du milieu à pH 6. Moyenne de 4 traitements à teneur en Mn variant de 0 à 30 p.p.m.*

pH 5, il n'en est pas de même à pH 6. Le calcium a tendance à augmenter avec les manifestations de la toxicité.

Le manganèse augmente fortement avec la teneur du milieu en cet élément, surtout pour des doses 50 et 100 p. p. m. de Cu. Un certain antagonisme Mn-Fe semble se manifester en présence du cuivre.

Pour chaque culture, la teneur en eau des parties aériennes à la récolte varie peu jusqu'à la dose Cu 200. Pour les fortes toxicités, l'hydratation des tissus diminue sensiblement.



GRAPHIQUE 9. — *Croissance de la Tomate en fonction de la teneur en cuivre du milieu à pH 5. Moyenne de 4 traitements à teneur en Mn variant de 0 à 30 p.p.m.*

Les poids de racines n'ont pas été indiqués car nous ne sommes pas assurés d'une récolte quantitative de celles-ci.

L'observation du système radiculaire permet de faire les mêmes remarques que pour les prélèvements effectués en plein champ. Pour les fortes toxicités il n'y a plus de chevelu, les racines sont raccourcies et nécrosées.

TABLEAU 7

Tomates — à pH 5

Analyse chimique des parties aériennes

N°	Mn	Cu	N	P	K	Ca	Mg	Cu	Mn	Fe
	dans le sol en p.p.m.		p. 100 de matière sèche					p.p.m. de matière sèche		
1	0	0	5,20	0,36	2,90	1,68	0,55	11,2	121	260
2	10	0	4,44	0,27	3,14	1,29	0,40	7,0	211	213
3	20	0	4,66	0,23	3,25	1,11	0,39	7,3	258	224
4	30	0	4,80	0,23	3,55	1,17	0,52	8,8	328	236
5	0	20	4,60	0,23	3,33	1,35	0,58	14,0	116	197
6	10	20	5,01	0,23	3,63	1,13	0,68	14,1	368	254
7	20	20	4,64	0,21	3,38	1,30	0,60	14,1	540	192
8	30	20	5,38	0,26	3,65	1,35	0,65	11,2	773	534
9	0	50	4,64	0,19	3,47	1,30	0,71	22,6	127	225
10	10	50	4,86	0,21	3,57	1,58	0,63	16,9	418	217
11	20	50	5,50	0,25	4,08	1,57	0,67	17,0	790	224
12	30	50	4,62	0,21	3,53	1,57	0,76	5,7	670	215
13	0	100	—	—	—	—	—	—	—	—
14	10	100	6,37	0,23	2,60	1,93	1,09	18,7	820	224
15	20	100	5,83	0,25	2,54	1,83	0,91	17,2	680	220
16	30	100	5,64	0,23	2,04	2,52	0,98	14,0	730	198

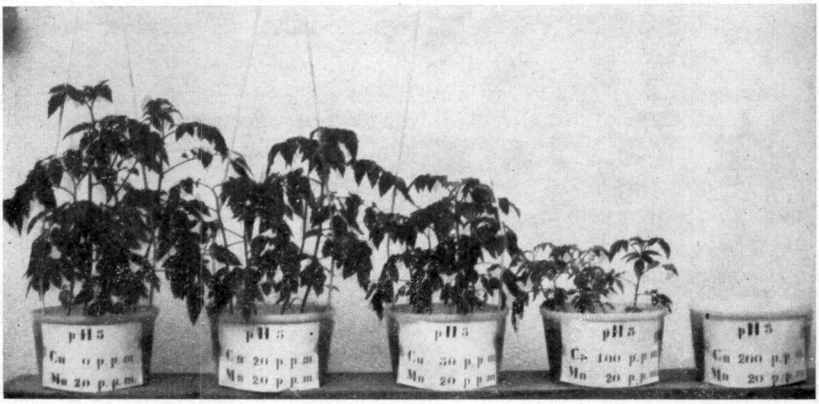


FIG. 1. — *Culture de tomates à pH 5 avec des teneurs en cuivre croissantes*

FIG. 2 — *Culture de tomates à pH 6 avec des teneurs en cuivre croissantes*

DISCUSSION

L'augmentation de la désorption de Cu^{2+} quand la concentration en ions H augmente n'a rien pour nous surprendre. L'activité des ions Cu^{2+} augmente lorsque le pH diminue. Il est donc normal que la toxicité du cuivre augmente également.

Le comportement des ions cuivriques dans les sols est cependant compliqué par les phénomènes de précipitation (BOISCHOT et QUILLON, 1952) et de formation de complexes (SCHLICHTING, 1955 ; BROADBENT et OTT, 1957 ; BROADBENT et LEWIS, 1961).

Dans les sols non calcaires, pauvres en matières organiques, pour les sols non carencés en cuivre, et surtout pour les sols enrichis en cet élément, ce sont les phénomènes d'adsorption qui sont prédominants. Une étude de ceux-ci a été faite par MULLER (1960). Cet auteur a précisé que l'adsorption du cuivre était à envisager sous deux formes soit sous celle d'ions cuivriques bivalents soit sous celle d'ions monovalents complexes du type $Cu\,X^{+}$. Les ions cuivriques bivalents étant l'espèce ionique la plus importante dans les conditions naturelles.

Les conditions d'échange de Cu^{2+} ont été bien précisées par MULLER qui constate que les quantités de Cu^{2+} adsorbées sur divers échangeurs et déterminées expérimentalement sont en bonne concordance avec celles qui sont calculées à partir de l'équation de FREUNDLICH, pour les faibles concentrations en cuivre rencontrées en Agriculture.

D'après Delas, le cuivre isotopique diluable serait dans les sols du même ordre que le cuivre échangeable (extractible à l'acétate d'ammonium normal neutre).

D'après les études de DELAS, DELMAS et DEMIAS, effectuées dans la région Bordelaise avec ^{64}Cu un tiers du cuivre appliqué depuis 70 ans est resté dans les sols sous forme facilement diffusible. Le cuivre isotopiquement diluable est du même ordre de grandeur que le cuivre échangeable extrait à l'acétate d'ammonium. Si nous insistons sur ce point c'est qu'il a prêté à controverse. Dans les cas de carence en Cu qui ont été les plus étudiés jusqu'ici les complexes pouvaient présenter une plus grande importance physiologique.

Il nous paraît donc logique de considérer que c'est bien le cuivre échangeable qui est à retenir pour l'étude des sols non calcaires enrichis en cuivre par les traitements, c'est cette méthode qui doit être appliquée pour les prospections dans les zones de vignobles à reconvertir ou qui doivent faire temporairement l'objet de cultures annuelles.

Le cuivre échangeable associé à la connaissance du pH donne de bonnes indications sur les risques d'intoxication des plantes annuelles ou des plantes pérennes installées dans la couche superficielle du sol.

La différence de sensibilité des espèces est évidente et nécessiterait des études plus complètes, mais on peut considérer que l'on risque une inhibition de développement à partir de 100 p. p. m. de Cu échangeable présent dans la couche exploitée par les racines dans les sols acides. A pH 5,0 la présence de 50 p. p. m. est déjà dangereuse pour certaines espèces. Ces teneurs se rencontrent déjà fréquemment dans les sols de vignoble après quelques dizaines d'années de traitement.

Aux indications bibliographiques déjà fournies, nous pourrions joindre quelques

observations postérieures à nos publications de 1953 et 1956. Ainsi, dans des échantillons de terre d'anciens vignobles qui nous ont été aimablement communiqués en 1961 par la C. N. A. B. R. L. à Nîmes (MM. VIGNERON et RUTTEN), nous avons trouvé des quantités de cuivre échangeable allant de 60 à 217 p. p. m. bien qu'aucune prospection systématique n'ait encore été effectuée à l'époque.

Si la vigne elle-même n'est pas encore visiblement atteinte, cela tient à la répartition du système radiculaire qui exploite une zone qui n'est enrichie en cuivre que lors des défonçages en raison de la fixation superficielle de ce cation même dans les sols sableux acides (DROUINEAU et MAZOYER, 1953 ; DELAS et *al.*, 1959).

Dans les profils, l'irrégularité de la distribution verticale du cuivre en provenance des traitements, qui peut être associée à l'irrégularité des pH sur le plan horizontal et sur le plan vertical, est une difficulté pour l'étude des toxicités dans les conditions de la culture. Les systèmes radiculaires sont d'ailleurs modifiés de la même manière que par un parasitisme. La diminution du développement du système radiculaire dans la couche superficielle confère parfois à celui-ci le même aspect que lors d'une forte attaque de nématodes. Le chevelu en bon état étant situé dans les couches inférieures lorsque l'aération du profil le permet.

Des observations en cultures sans sol en milieu fractionné montrent d'autre part que la toxicité du cuivre est moins marquée lorsqu'une fraction du système radiculaire s'alimente dans une solution dans laquelle le cuivre n'est pas présent en quantités toxiques (moins de 0,2 p. p. m.).

C'est une des raisons pour lesquelles il est prudent de se contenter pour l'instant des observations sur les plantes annuelles.

En ce qui concerne l'influence du cuivre sur la composition chimique des plantes cultivées on peut comparer les résultats que nous avons obtenus à ceux de FORSTER (1954). Cet auteur a fait des expériences en pots et limon sableux à pH 5,9 avec avoine, seigle, orge, betterave, choux et a analysé également des plantes jeunes. Toutefois la teneur en cuivre du milieu était plus élevée (plus de 250 p. p. m.).

Comme nous mêmes, FORSTER constate des différences entre les espèces. La toxicité du cuivre augmente les teneurs en Ca et Mg et diminue la teneur en K. Il y a également augmentation des teneurs en cuivre et en manganèse. Par contre, nos résultats diffèrent en ce qui concerne l'influence de la toxicité du cuivre sur les teneurs en P.

Le fait important est la décroissance assez générale de la teneur en potassium conséquence de la dégradation du système radiculaire, malgré la diminution de la dilution résultant de l'inhibition de la croissance.

Nous avions déjà constaté cette diminution du potassium dans des observations effectuées en plein champ (région de Fréjus, 1952) sur glaïeuls, épinards et *Solanum nigrum*. Les observations sur la composition chimique des plantes intoxiquées par le cuivre en plein champ (DROUINEAU et MAZOYER 1953) sont confirmées par les cultures en pots notamment en ce qui concerne les teneurs en azote qui sont augmentées.

Dans l'ensemble de nos observations en pots et en plein champ nous avons pu constater que la toxicité du cuivre n'était qu'exceptionnellement accompagnée des symptômes de la chlorose ferrique. D'autres auteurs, comme REUTHER et *al.* et FORSTER, ont également noté ce fait. D'ailleurs, l'influence de la toxicité du cuivre modifie de manière très irrégulière suivant les espèces, le teneur en Fe des tissus, alors

que pour le manganèse on constate généralement une augmentation plus régulière. Les phénomènes de chlorose ne sont nets que pour les épinards et les pêchers. Pour les espèces que nous avons cultivées en pots nous n'avons constaté qu'un retard dans la végétation et un nanisme particulièrement net chez le Lupin. Il est donc naturel que lorsque la toxicité n'est pas très marquée, elle passe inaperçue puisque, sauf pour les espèces chez lesquelles se manifeste une chlorose ferrique, il n'y a pas de symptômes caractéristiques. D'autre part, l'existence d'une accumulation de cuivre peut rester longtemps inaperçue puis être révélée par la baisse de pH résultant d'une utilisation de soufre, de bouillies sulfo-calciques ou d'engrais acidifiants, la teneur en cuivre du milieu restant constante. Nous avons eu l'occasion, depuis notre publication de cette observation en 1953, de faire les mêmes constatations à plusieurs reprises sur des défriches de vignobles et de vergers. (Photo.)

FIG 3. — *Toxicité du cuivre sur glaïeuls et tomates à l'emplacement d'une ligne d'arbres arrachés*

L'expérience acquise depuis cette époque dans les conditions de la pratique et pour des teneurs en cuivre comme celles que nous avons traitées, c'est-à-dire de l'ordre de 100 p. p. m., montre que le chaulage permet des cultures normales.

Nous avons recherché en général un pH de 6,5 et employé la chaux magnésie. Dans les conditions de la Vallée de l'Eyrieux le relèvement du pH obtenu avec application d'urée a provoqué également un reverdissement du Pêcher. Dans les mêmes conditions de sol, les chélates de fer provoquent également un reverdissement, ce qui serait à rapprocher des constatations de MAJUMDER et DUNN (1959) sur l'effet de l'acide éthylène-diamine-tetraacétique sur la toxicité du cuivre pour le Maïs en solution nutritive.

CONCLUSION

Depuis une dizaine d'années, les observations sur l'accumulation du cuivre dans les sols de vignobles et de vergers se sont multipliées. Il n'est maintenant plus douteux

que, du fait des traitements antiparasitaires, ou de l'apport inconsidéré d'engrais renfermant des oligo-éléments, la teneur de la couche superficielle puisse atteindre et même dépasser 100 p. p. m. de Cu échangeable.

C'est le cuivre divalent adsorbé sur l'argile et extrait par l'acétate d'ammonium normal neutre qui présente le plus d'intérêt pour l'appréciation des risques de toxicité. Les essais en pots montrent que, pour toutes les espèces essayées, la toxicité du cuivre augmente très fortement quand le pH diminue et que les différentes espèces végétales varient dans leur sensibilité à la teneur en cuivre du milieu pour un même sol et un même pH. Bien que l'on ne puisse indiquer de seuil avec exactitude et que celui-ci puisse évidemment varier avec la teneur en matières organiques du milieu, on peut considérer que la toxicité est manifeste à partir de 100 p. p. m. en dessous de pH 6. En dessous de pH 5, des teneurs voisines de 50 m. p. p. m. peuvent diminuer la croissance. Les modifications dans la composition des plantes sont surtout le reflet de l'absence de développement et de la détérioration du système radiculaire.

Il n'y a pas de symptôme spécifique de la toxicité du cuivre, pour les parties aériennes. La chlorose ferrique ne se manifeste que chez certaines espèces. Le rabougrissement du système radiculaire et des phénomènes de nanisme assez homogènes dans les parties aériennes sont les seuls indices qui puissent orienter un diagnostic. Le dosage du cuivre échangeable et la mesure du pH sont donc indispensables dans les sols non calcaires ayant porté des vignobles et des vergers pendant longtemps, après arrachage des vieux plants.

Ces déterminations ont un caractère obligatoire dans le cas d'une reconversion et si l'on envisage des cultures annuelles (céréales, cultures maraîchères et florales).

Quand la teneur en cuivre n'est pas trop élevée (moins de 200 p. p. m. de Cu échangeable) on peut remédier à la toxicité par des chaulages et l'emploi systématique d'engrais alcalinisants, tout au moins temporairement, comme l'urée et le bicarbonate de potasse. Bien entendu, le relèvement du pH peut être risqué dans des sols légers ou suspects de crypto-carences en oligo-éléments et l'ensemble du comportement de ceux-ci devra être envisagé.

Reçu pour publication en février 1962.

SUMMARY

CONTRIBUTION TO THE STUDY OF COPPER TOXICITY IN SOILS

There has been an increase in observations on the copper content of the arable layer in vineyards and orchards in the last few years, particularly in France. These observations show conclusively that activity of the copper ion increases with the number of years in which anticryptogamic treatments had been applied.

The levels of exchangeable copper already reached dangerous levels in non-calcareous soils in which pH had been decreased by cultural measures (fertilizing, pest control).

A series of pot experiments involving different pH values and copper concentrations of 0 - 200 p. p. m. show an increase in copper toxicity with decreasing pH. The experiments were conducted with lupin, maize, beans and tomato. Copper toxicity occurs at levels of 100 p. p. m. Cu below pH 6. There are differences in the sensitivity to copper according to plant species.

Copper toxicity increases the concentrations of nitrogen, calcium and magnesium in the plant, and often decreases the concentration of potassium. Copper toxicity checks the growth of the root system.

ZUSAMMENFASSUNG

BEITRAG ZUR FRAGE DER GIFITIGKEIT DES KUPFERS IM BODEN

Die Beobachtungen über den Kupfergehalt der Ackerkrume von Weinbergen und Obstgärten haben seit einigen Jahren, besonders in Frankreich, stark zugenommen.

Besonders gefährlich sind die an austauschbarem Kupfer erreichten Gehalte in nicht kalkhaltigen Böden, deren pH-Wert durch die Kulturmethoden (Dünger, Spritzmittel) herabgesetzt wurde.

Eine Reihe Gefässversuche mit unterschiedlichen pH-Werten, mit Kupfergehalten von 0 bis 200 ppm Zeigen wie die Giftigkeit des Kupfers zunimmt, wenn der pH-Wert abnimmt. Dies wurde u. a. auf Lupinen. Mais, Bohnen und Tomaten ausprobiert. Die Giftigkeit des Kupfers wird von 100 ppm unt unter pH-6,0 offenbar. Die Kupferempfindlichkeit ist jedoch je nach Pflanzenart verschieden.

Die Giftigkeit des Kupfers steigert den Gehalt an Stickstoff, Kalcium und Magnesium der Pflanzen und setzt denjenigen an Kali herunter. Sie hemmt besonders die Entwicklung des Wurzelsystems.

К вопросу о токсичности меди в почвах.

Г. ДРУИНО и РОЗА МАЗУАЙЕ.

За последние годы, особенно во Франции, умножились наблюдения над количествами меди в пахотном слое почв виноградников. Они доказывают что увеличивающаяся с каждым годом активность иона меди вызывается вне всякого сомнения фунгисидным лечением лозы.

Процентное содержание обменной меди в этих почвах может оказаться опасным для растений, особенно в почвах малоизвестковых где PH был понижен приемами окультуривания (удобрения, противопаразитные средства).

Серия опытов в вегетационных вазах с различным PH и с количеством меди возроставшим от 0 до 200 частей миллион, наглядно показала как увеличивалась токсичность меди по мере того как понижался PH среды. Экспериментации подверглись люпин, кукуруза, фасоль и помидоры. Токсичность меди начичала проявляться от дозы в 100 частей миллион при PH ниже 6,0. Что-же касается чувствительности растений к вредным дозам меди, то менялась она в зависимости от их рода.

Токсичные дозы меди увеличивали вынос растениями азота, кальция и магнезия, уменьшая количества поглощенного калия и приостанавливая при этом развитие корневой системы.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ANDRÉ L., 1959. Observations préliminaires sur les phénomènes de phytotoxicité dus à l'accumulation du cuivre dans certains sols cultivés. *B. Soc. Franc. Physiol. Vég.*, **5**, 90-92.

ANNE P., DUPUIS M., 1953. Toxicité du cuivre à l'égard de quelques plantes cultivées. *C. R. Acad. Agric.*, 39, 58.

BOISCHOT P., QUILLON P., 1952. Fixation du cuivre dans les sols calcaires. *Ann. Agron.*, **3**, 359-363.

BROADBENT F. E., OTT J. B., 1957. Soil organic matter-metal complexes : 1. Factors affecting retention of various cations. *Soil Sci.*, **83**, 419-427.

BROADBENT F. E., LEWIS T. E., 1961. Soil organic matter-metal complexes : 3 exchange reactions of model compounds. *Soil Sci.*, **91**, 341-348.

CROOKE W. M., 1958. Effect of heavy-metal toxicity on the cation-exchange capacity of plant roots. *Soil Sci.*, **86**, 231-240.

DELAS J., DELMAS J., RIVES M., BAUDEL C., 1959. Toxicité du cuivre dans les sols viticoles du Sud-Ouest atlantique. *C. R. Acad. Agric.*, **45**, 651-655.

DELAS J., DELMAS J., DEMIAS C., 1960. Étude par dilution isotopique du cuivre incorporé dans les sols depuis 70 ans. *C. R. Acad. Sci.*, **250**, 3867-3869.

DEPARDON L., BURON P., 1955. Cultures agricoles sur défrichement de vigne. *Ann. Agric.*, 161-167.

DEPARDON L., BURON P., 1956. Cultures agricoles sur défrichement de vigne. *Rapp. 6. Congr. Intern. Sci. Sol*, Paris, Vol. D, 433-43.

DROUINEAU G., MAZOYER R., 1953. Toxicité du cuivre et évolution des sols sous l'influence des antiparasitaires. *C. R. Acad. Agric.*, 390-392.

DROUINEAU G., MAZOYER R., 1956. Toxicité du cuivre dans les sols. C. R. 6e. *Congr. Intern. Sci. Sol.*, **4**, 419-421.

DUVIGNEAUD P., DENAEYER-DE-MET S., 1960. Action de certains métaux lourds du sol (cuivre, cobalt, manganèse, uranium) sur la végétation dans le Haut-Katanga. 1er *Coll. Soc. Bot. France*, Masson, 121-139.

FORSTER W. A., 1951. Some effects of metal in excess on crop plants grown in soil culture, IV. Effect of copper on mineral status of crop plants. *Ann. Rep. Long. Ashton*, Bristol, 102.

FORSTER W. A., 1954 Toxic effects of heavy metals on crop plants grown in soil culture. *Ann. Appl. Biol.*, **41**, **4**, 637-551.

FORBES R. H., 1917. Certains effects under irrigation of copper compounds upon crops. *Univ. Cal. Pub. Agric. Sci.*, 12, 395.

GARTEL W., 1957. Studies on the copper content of vineyards and vineyards soils. *Weinberg u. Keller*, **4**, 221-229.

GIBSON I. A. S., 1958. Phytotoxic effects of copper fongicids on acid soils. *East. Afri. Agric. J.*, **24**, 125-127.

GILBERT F. A., 1952. Copper in nutrition. *Adv. Agr.*, **4**, 147-177.

GIRARD A., 1895. Sur l'accumulation dans le sol des composés cuivriques employés pour combattre les maladies parasitaires des plantes. *C. R. Acad. Sci.*, **120**, 1147-1152.

HIRST J. M., LE RICHE H. H., BASCOMB C. L., 1961. Copper accumulation in the soils of apple orchards near Wisbech. *Plant Pathol.*, **10**, 105-108.

ISIZUKA Y., 1940. The toxic action of copper ions on the growth of Rice plant. *J. Sci. Soil. Manure Nippan.*, **16**, 43-15.

MAJUMDER S. I., DUNN S., 1959. Modifying effect of EDTA on the copper toxicity to corn in nutrient solution. *Plant and Soil.*, **10**, 296-298.

MAQUENNE L., DEMOUSSY E., 1919. Sur la richesse en cuivre des terres cultivées. *C. R. Acad. Sci.*, **169**, 937-942.

MAZOYER R., 1958. Sur une nouvelle méthode colorimétrique du dosage du cuivre dans les plantes. *Ann. Agron.*, 299-300.

MICHEL A., 1948. Etude préliminaire sur un nouvel aspect du problème du court-noué de la vigne. *Ann. Agron.*, 179-193.

MULLER J., 1960. Echanges des ions cuivriques sur les colloïdes minéraux. *Ann. Agron.*, 75-91.

REUTHER W., SMITH P. F., 1952. Iron chlorosis in Florida cirtus groves in relation to certain soil constituents. *Proc. Florida State Hort. Soc.*, **65**, 62-29.

REUTHER W., SMITH P. F., 1953. Effects of high copper content of sandy soil on growth of citrus seedlings. *Soil Sci.*, **75**, 219-224.

REUTHER W., SMITH P. F., SCUDDER G. K., 1953. Relation of pH and soil type to toxicity of copper to citrus seedlings. *Proc. Florida State Hort. Soc.*, **66**, 73.

SCHLICHTING E., 1955. Kupferbindung und fixierung durch humusstoffe. *Acta Agric. Scand.*, **5**, 313-356.

TASCHENBERG E. F., MACK G. L., GAMBRELL F. L., 1961. DDT and copper residues in a vineyard soil. *Agric. Food. Chem.*, **9**, 207-209.

XUEREFF R., 1959. La toxicité du cuivre dans les vergers de pêchers de la Vallée de l'Eyrieux. *Prog. Agric. Ardèche.*, **49**, 1-6.

Ann. agron., 1962, **13** (1), 55-63.

631. 423. 4

UNE MÉTHODE DE FRACTIONNEMENT DENSIMÉTRIQUE PAR CENTRIFUGATION DES MATIÈRES ORGANIQUES DU SOL

G. MONNIER, L. TURC et Colette JEANSON-LUUSINANG

Avec la collaboration technique de Cl. JEANDET

Laboratoire des Sols, Laboratoire d'Étude des Techniques culturales, Centre national de Recherches agronomiques, Versailles (Seine-et-Oise)

SOMMAIRE

Une méthode de fractionnement densimétrique, par centrifugation, des matières organiques du sol est décrite. Les résultats, comparés à ceux de fractionnements densimétriques par simple décantation, font apparaître une simplification et une plus grande vitesse de réalisation. La qualité de la séparation devient tout à fait satisfaisante.

Rappelons qu'il existe dans le sol deux formes très distinctes de matières organiques, bien que soient toujours présents quelques constituants de caractères intermédiaires : la première, plus ou moins grossière, a pour caractéristiques d'être constituée par des débris végétaux, en début d'évolution, non encore fixés à la fraction minérale du sol ; la deuxième est au contraire diffuse, intimement liée à la masse des constituants minéraux ; elle est composée en grande partie de corps évolués de C/N voisin ou inférieur à 10 et qui, contrairement aux premiers, de C/N beaucoup plus élevé, sont peu susceptibles d'une évolution fermentative rapide. Alors que le premier type comprend les matières organiques d'apport récent, ou qui, pour des raisons rattachées soit à leur nature soit aux conditions de milieu, ont peu subi les processus d'humification, le deuxième est essentiellement composé par ce que l'on désigne plus particulièrement par le vocable « d'humus ». Seule, évidemment, cette fraction est à même d'avoir une influence directe sur les propriétés physico-chimiques du sol.

Ces quelques considérations soulignent l'intérêt qu'il y a à séparer avant dosage ces deux fractions.

Différents auteurs ont proposé des méthodes de fractionnement densimétriques

qui reposent sur le principe suivant : la densité de la matière organique libre, voisine de 1, est plus faible que celle du complexe organominéral. L'échantillon est fractionné dans un liquide de densité convenable. Après séparation, chaque fraction est étudiée à part. LEIN (1940) utilisait déjà des mélanges de liquides organiques. HENIN et TURC (1949) ont présenté une technique de séparation dans des béchers, avec des mélanges de benzène et de bromoforme. La technique de séparation proposée par ces auteurs permet dans la plupart des cas de se faire une idée assez précise de l'état des matières organiques dans l'échantillon étudié. Elle présente cependant deux types d'inconvénients. Les premiers sont d'ordre technique : malgré une amélioration due à C. JEANSON-LUUSINANG (1960) la technique se prête mal au travail en série ; elle est délicate et demande un certain tour de main ; par ailleurs, l'amélioration citée nécessite l'utilisation d'un matériel spécial (entonnoirs à décantation de caractéristiques bien déterminées). D'autre part, la séparation devient insuffisante pour les échantillons contenant des matières organiques fines, petites radicelles de plantes de prairie par exemple, qui restent accrochées à la fraction dense du sol.

Dans le but de remédier à ces inconvénients, nous avons repris et mis au point une technique de séparation par densité par centrifugation déjà utilisée par LEIN et qui nous paraissait pourvoir parfaire la séparation et permettre un travail en série dans du matériel standard.

I. — DESCRIPTION DE LA TECHNIQUE PROPOSÉE

L'échantillon constitué à partir de terre séchée à l'air et tamisée à 2 mm, est de 5 ou 10 g suivant la teneur supposée en matières organiques libres. Il peut être commode, en effet, de traiter une prise de terre telle que la fraction peu dense obtenue puisse constituer la totalité de la prise d'essai pour le dosage ultérieur du carbone qu'elle contient (soit 150 mg environ de fraction peu dense pour une oxydation par du bichromate à 8 %). Cependant, on doit signaler que des séparations de fractions peu denses de 1 500 mg ont pu être réalisées dans des conditions normales avec le matériel utilisé (pots de centrifugeuses de 100 cc et de 25 mm de diamètre). Dans tous les cas, la prise doit être représentative de l'échantillon.

1° *Destruction des agrégats.*

Cette opération a pour but de libérer des matières organiques libres emprisonnées mécaniquement dans les agglomérats. Elle peut être effectuée, soit en détruisant la structure par ébullition dans l'eau, suivie d'un séchage à l'étuve sous l'alcool pour éviter la réapparition d'une cohésion, soit par broyage et tamisage à 500 μ de l'échantillon sec. En fait, lorsqu'on opère par centrifugation, la deuxième technique donne d'aussi bons résultats ; elle est beaucoup plus rapide et ne risque pas de provoquer des redistributions de substances solubles ou pseudo-solubles.

2° *Fractionnement.*

L'échantillon est placé dans un tube de centrifugeuse de 100 cc qui est ensuite rempli avec le liquide densimétrique choisi. On agite avec une baguette de verre et on centrifuge pendant 5 minutes à une vitesse telle que l'accélération au centre du tube soit de l'ordre de 1 000 g (1). L'arrêt de la centrifugation doit s'effectuer sans l'aide d'un dispositif de freinage dont l'usage risquerait de provoquer une remise en suspension partielle du culot constitué par la fraction la plus dense. Le surnageant est recueilli sur un filtre plat. Le tube est alors empli de nouveau de liquide densimétrique, le culot remis en suspension et recentrifugé 5 minutes à la même vitesse de façon à séparer les matières organiques libres qui auraient pu rester emprisonnées lors de la première centrifugation. Ce surnageant est recueilli sur le même filtre plat que le premier ; les parois du tube sont rincées à l'aide d'un jet du liquide densimétrique en prenant soin de ne pas détacher du culot des parti-

(1) g = accélération de la pesanteur.

TABLEAU I

Comparaison des méthodes par entonnoir et par centrifugation et étude de la reproductibilité de ces méthodes (nº 1 et 2 pour chaque échantillon)

Fractions de densité inférieure à 2 (Fl)

Méthode		Entonnoir				Centrifugation				Comparaison des 2 méthodes (*a*)		
Désignation des échantillons (Prise d'essai 10 g)		Fl mg (1)	C mg (2) dans 1 g de Fl	C/N (3)	C mg (de Fl) dans 1 g de terre totale (4)	Fl mg (5)	C mg dans 1 g de Fl (6)	C/N (7)	C mg (de Fl) dans1gde terre totale (8)	$\frac{\Delta Fl}{Fl} \times 100$ (9)	$\frac{\Delta C‰ \text{ de Fl}}{100 \quad C‰ \text{ de Fl}}$ (10)	$\frac{\Delta C}{C}$ (*b*) (11)
Jeune prairie sur sable fin nº 636.	nº 1	131	196	17,8	2,57	212,5	201	16,8	4,27			
	nº 2	127	202	18,4	2,56	201,5	202	17,3	4,07	+ 60	+ 1,2	+ 62,2
	Erreur relative	3,1 %	3 %	—	0,4 %	5,3 %	0,5 %		4,8 %			
Rendzine blanche nº 650 sur craie.	nº 1	117	241	28,0	2,82	194	228	26,2	4,42			
	nº 2	149	237	27,4	3,53	191,5	228	26,2	4,37	+ 45	— 4,6	+ 37,5
	Erreur relative	24 %	1,6 %	—	22,3 %	1,3 %	0	—	1,3 %			
Vieille prairie sur limon nº 115.	nº 1	268	192	23,2	5,15	336	240	20,7	8,06			
	nº 2	318	169	21,5	5,37	337	240	20,2	8,08	+ 32,2	+ 33,3	+ 53,6
	Erreur relative	17,0 %	12,8 %	—	4 %	0,3 %	0	—	0,3 %			
Pédologie expérimentale 1958	nº 1	282	168	28,2	4,74	332	214	27,5	7,10			
	nº 2	243	196	31,0	4,76	338	211	27,6	7,13	+ 28,3	+ 16,6	+ 50
	Erreur relative	14,8 %	15,2 %	—	0,4 %	1,8 %	1,8 %	—	0,5 %			

(*a*) Variation relative des résultats obtenus par centrifugation, la méthode à l'entonnoir servant de base de référence.
(*b*) Variation relative du carbone non lié rapporté à la terre totale.

cules de la fraction dense. Avec le mélange alcool-bromoforme que nous avons utilisé, les culots ont toujours, semble-t-il, une cohésion suffisante pour rendre faciles et rapides ces manipulations et pour éviter tout mélange des fractions.

Dans le cas de terres contenant une masse importante de matières organiques libres, les risques d'emprisonnement de particules plus denses que le liquide au sein de cette fraction sont parfois tels qu'il est recommandable de recentrifuger le premier surnageant. Celui-ci est alors recueilli non sur un filtre plat, mais dans un tube de centrifugation et recentrifugé 5 minutes dans le liquide densimétrique.

En fait, les termes correctifs obtenus par recentrifugation des fractions sont très faibles et même fréquemment négligeables.

Les filtres contenant les fractions peu denses et les tubes contenant les fractions denses sont séchés à l'étuve à 105°C.

Lorsqu'on désire un séchage rapide ou lorsque des études chimiques des fractions nécessitent un séchage à plus basse température il est possible d'éliminer le bromoforme par un lavage des fractions à l'alcool, avant leur mise à l'étuve.

Les fractions séchées jusqu'à poids constant sont pesées. Leur teneur en carbone est évaluée par la méthode de ANNE ; l'azote (organique + ammoniacal) est dosé sur une aliquote de la même attaque sulfochromique que le carbone. L'azote ainsi minéralisé, bien qu'en légèrement plus faible quantité que par une attaque Kjeldhal permet de comparer avec le minimum d'erreur les rapports C/N des fractions.

3° Liquides densimétriques.

La densité qui permet le plus couramment de séparer dans les meilleures conditions les deux formes « libres » et « liées » est la densité 2. On peut avoir des résultats plus complets en faisant plus de 2 fractions, en utilisant successivement des liquides à densité 1,75 – 2 – 2,25. Dans ce cas, là, on aura évidemment soin de faire sécher l'échantillon entre deux fractionnements de façon à éviter de modifier la densité du liquide utilisé en deuxième et troisième lieux.

Les liquides densimétriques sont obtenus en mélangeant du bromoforme (la qualité dite « pur » à 0,5 % d'alcool convient) avec soit du benzène, soit du tétrachlorure de carbone, soit de l'alcool éthylique celui-ci étant recommandable en raison de sa faible toxicité pour le manipulateur. Après filtration, le liquide peut servir à nouveau, non sans que l'on ait vérifié et éventuellement réajusté sa densité (notons que la centrifugation, même en tube non bouché, ne modifie pas la densité du liquide). De temps en temps, il faut le distiller pour éliminer les traces de corps organiques non volatils qu'il a pu dissoudre et qui risqueraient de fausser les résultats de certaines analyses chimiques obtenus sur des fractions séparées ultérieurement dans ce liquide.

II. — RÉSULTATS ET DISCUSSION

Nous les présenterons en comparaison avec ceux obtenus sur les mêmes échantillons par la méthode des entonnoirs à décantation de C. JEANSON-LUUSINANG prise comme référence.

Les tableaux 1 et 2 rassemblent les données fournies par les deux techniques appliquées comparativement à 4 échantillons de sols.

TABLEAU 2

Comparaison des méthodes par entonnoir et par centrifugation. Fractions de densité supérieure à 2 (F_d)

Méthode	Entonnoir (1)		Centrifugation (1)	
Désignation des échantillons	C °/₀₀ de F_d (2)	C/N	C °/₀₀ de F_d (2)	C/N
Vieille prairie sur limon n° 11 ...	18,7	10,4	16,05 (1)	9,8
Pédologie expérimentale 1958 (H. B. + luzerne).....	19,6	10,2	17,7 (1)	9,85

(1) moyenne de deux essais.
(2) teneur en carbone de la fraction dense.

a) *Reproductibilité interne par les deux méthodes*

Par les 2 méthodes la reproductibilité interne des résultats obtenus sur le taux de carbone de la fraction légère rapporté à la terre totale (4) est en général très satisfaisante. Il convient toutefois de noter une différence :

Par la méthode des entonnoirs à décantation la faiblesse de l'erreur sur (4) est due à une compensation des erreurs sur (1) et sur (2). Concrètement cela traduit le fait que, par cette méthode, les fractions légères sont fréquemment souillées par des particules minérales restées accrochées sur les parois de l'entonnoir. C'est cette surcharge de Fl qui entraîne en compensation un abaissement du taux de carbone de la fraction. Ceci est particulièrement visible sur l'échantillon « Pédologie expérimentale 1958 » (tableau 1). Au contraire, par centrifugation, ce sont des erreurs faibles à la fois sur (5) et (6) qui font que l'erreur sur (8) est très réduite. Il devient alors possible d'utiliser, pour certaines recherches, ces deux données directes du fractionnement, et non plus seulement leur produit.

b) *Comparaison des deux méthodes*

Par centrifugation, la masse des fractions peu denses extraites des 4 terres étudiées est augmentée de 30 à 60 % ; la teneur en carbone de ces fractions demeure pratiquement inchangée dans deux cas, croît de 15 à 30 % dans les deux autres. Rapporté à la terre totale, le taux de carbone présent dans le sol sous forme libre apparaît comme plus élevé de 40 à 60 %, Parallèlement, le C/N de la fraction légère est plus élevé de 5 % environ par la méthode à l'entonnoir, probablement parce que seules les matières organiques les plus grossières, pour lesquelles le contact avec la partie minérale est le plus faible, sont séparées.

Sur le tableau 2, on peut constater que, mieux débarassée des matières libres à C/N élevé, la fraction dense obtenue par centrifugation présente un taux de carbone et un rapport C/N légèrement plus faibles.

Cette augmentation considérable de la masse peu dense extraite nous a conduit à essayer d'extraire par centrifugation pour la caractériser la partie de la fraction libre qui n'avait pu être séparée de la fraction dense par la méthode à l'entonnoir. Les résultats sont consignés dans le tableau 3.

Pour faciliter la lecture de ce tableau 3 nous prendrons un exemple : « Pédologie Expérimentale 1958 » n° 1.

Par la méthode à l'entonnoir, on a pu extraire de 10 g de cet échantillon 282 mg de fraction peu dense (1) présentant une teneur en carbone de 168 p. 1 000 (2) soit, rapporté à l'échantillon total un taux de carbone « non lié » de 4,74 p. 100 (4). La centrifugation directe sur cet échantillon permet, elle, d'extraire 338 mg de Fl pour 10 g de sol (9) représentant 7,10 p. 1 000 de carbone « non lié » rapporté à la terre totale (10). La centrifugation de la fraction dense obtenue par la première méthode permet de récupérer une fraction peu dense de 102 mg (5). Cette fraction présente une teneur en carbone élevée de 204 p. 1 000 (b) et un rapport C/N élevé : 24,9 (7). Il s'agit donc bien d'un matériau comparable à celui extrait par décantation. Ce fait est d'ailleurs confirmé par l'observation directe à la loupe binoculaire. Enfin on constate que la somme (1) + (5) = 6,82 p. 1 000, des quantités de carbone respectivement contenues dans la fraction séparée par décantation et dans celle récu-

TABLEAU 3

Essai de récupération par centrifugation de la partie de fraction légère restée emprisonnée dans la fraction dense obtenue par la méthode à l'entonnoir

Opérations		Fractionnement sur entonnoir				Centrifugation de la fraction dense « Entonnoir »				Somme des fractions légères		Centrifugation directe de l'échantillon initial		
Désignation des échantillons (prise d'essai 10 g)		Fl mg (1)	C mg dans 1 g de Fl (2)	C/N (3)	C mg (de Fl) dans 1 g de terre totale (4)	Fl mg (5)	C mg dans 1 g de Fl (6)	C/N (7)	C mg (de Fl) dans 1 g de terre totale (8)	(1) + (5)	(4) + (8)	Fl mg (9)	C mg (de Fl) dans 1 g de terre totale (10)	C/N (11)
Vieille prairie de Bernay sur limon n° 115.	n° 1	268	192	23,2	5,15	110	193	16,4	2,12	378	7,27	336	8,06	20,7
	n° 2	318	169	21,5	5,37	108	193	16,4	2,08	426	7,45	337	8,08	20,2
Pédologie expérimentale 1958.	n° 1	282	168	28,2	4,74	102	204	24,9	2,08	384	6,82	338	7,10	27,6
	n° 2	243	196	31,0	4,76	96			1,96	339	6,72	332	7,13	27,5

pérée ensuite par centrifugation de la fraction dense ainsi obtenue, et rapportées à la terre totale est très voisine de la teneur en carbone « non lié » de la terre totale (10) traitée directement par centrifugation : 7,1 %.

Pour tester en valeur absolue la technique proposée, nous avons fabriqué deux échantillons artificiels en ajoutant au cours d'un malaxage sous l'eau à de la terre ne contenant pratiquement pas de matières organiques libres (horizon B du sol de limon de Versailles) 10 % de farine de paille d'avoine de granulométrie inférieure à 200 μ ou comprise entre 200 μ et 2 mm. La pâte soigneusement homogénéisée a été ressuyée sur Buchner et séchée à l'étuve. Dans les deux cas l'addition de matière organique libre correspondait à 47,5 p. 1 000 de carbone.

Aux deux échantillons obtenus enrichis en farine de paille d'avoine très fine pour l'un, plus grossière pour l'autre, on a appliqué les deux techniques (entonnoir et centrifugation).

Les résultats sont rassemblés dans le tableau 4.

TABLEAU 4

Séparation par densité d'échantillons enrichis en matières organiques libres fines ou grossières
Le carbone contenu dans chaque fraction est rapporté à la terre totale

Échantillon	Méthode	$d < 2$		$d > 2$		Total
		C °/₀₀	C/N	C °/₀₀	C/N	C °/₀₀
Horizon B + 10 % farine de paille d'avoine fine.	Entonnoir	20,9	76,3	27,8	29,7	48,7
	Centrifugation	34,8	71,0	12,3	19,5	47,1
Horizon B + 10 % farine de paille d'avoine grossière.	Entonnoir	43,4	—	8,4	16,4	51,8
	Centrifugation	46,2	—	4,9	11,5	51,1

Il ressort de ces résultats que lorsque la matière organique libre est grossière, l'amélioration due à la centrifugation quoique encore sensible est relativement faible, (de l'ordre de 5 à 10 p.100 sur le carbone p. 1 000 de terre totale), mais alors la quasi-totalité de la fraction libre totale de la matière organique présente est extraite par la technique proposée.

Par contre, lorsque la matière organique libre est sous un état très divisé, le gain par utilisation de la centrifugation est considérable (près de 70 % dans le cas présent, mais aussi 50 à 60 % dans le cas des sols de prairies cités plus haut et très riches en radicelles fines et poils absorbants) bien que cette technique ne parvienne pas à extraire la totalité de la fraction libre présente.

Il faut, toutefois, souligner qu'il s'agit ici d'un cas très particulier et nous avons vu (tableau 1) que l'extraction pouvait être considérée comme suffisante [1] dans le cas des sols normaux puisque le rapport C/N des fractions denses descendait à des valeurs inférieures à 10 alors qu'ici il est encore de 19,5 par suite de la présence de paille d'avoine non extraite.

On notera que le bilan en carbone qui devrait faire apparaître un taux de carbone total de 51,5 p. 1 000, 47,5 p. 1000 provenant de l'addition de paille et 4 p. 1 000

[1] Ce fait est confirmé par l'observation directe des fractions denses à la loupe binoculaire.

provenant de la matière organique initiale de l'horizon B) n'est satisfaisant que dans le cas de l'addition de paille peu divisée. En présence de farine de paille fine, on constate une disparition de carbone. La seule explication vraisemblable est la solubilisation dans le liquide densimétrique de certains constituants des pailles à partir du matériau le plus divisé.

CONCLUSION

L'utilisation de cette technique de fractionnement par centrifugation présente des avantages dans deux ordres d'idée.

1° — Du point de vue technique, l'opération est considérablement simplifiée, et devient beaucoup plus rapide : un opérateur disposant d'une centrifugeuse à 8 pots peut réaliser 8 fractionnements en moins de deux heures et cela en manipulant 4 à 5 fois moins de liquide densimétrique que par la méthode des entonnoirs à décantation. De plus le matériel nécessaire existe dans la plupart des laboratoires d'étude du sol.

2° — Le plus gros progrès réalisé concerne toutefois la qualité du fractionnement.

Pour la plupart des échantillons étudiés, la séparation est tout à fait satisfaisante. Les fractions légères sont plus « spécifiques » que par décantation ce qui permet d'utiliser directement leur poids pour certaines comparaisons. Les fractions denses, elles aussi, sont débarrassées de la presque totalité des particules organiques libres. Leur teneur en carbone peut être interprétée plus facilement et plus sûrement

Seules quelques matières organiques très fines restent, nous l'avons vu, difficiles à séparer, bien que ce soit dans leur cas que l'amélioration due à la centrifugation soit la plus sensible; mais il ne s'agit là que d'échantillons spéciaux et encore faudrait-il savoir si, en deça d'une certaine taille des particules organiques, il ne se crée pas de liaisons plus intimes entre elles et les particules minérales.

Hormis ces cas spéciaux, la technique proposée apparaît simple, d'emploi rapide, fidèle et beaucoup plus efficace, que les techniques utilisées jusqu'ici dans le même but. Elle devrait permettre une généralisation du fractionnement des matières organiques qui est, nous l'avons vu, indispensable pour les études à court terme de bilan organique des sols et pour les recherches concernant les relations entre la matière organique et différentes propriétés physiques ou chimiques du sol.

Reçu pour publication en janvier 1962.

SUMMARY

A METHOD OF DENSIMETRIC FRACTIONATION OF SOIL ORGANIC-MATTER BY CENTRIFUGING

Densimetric fractionation of soil organic-matter permits the separation of « free » organic-matter, consisting of slightly evolved products of high C/N ratios and possessing a lower density, from the organo-mineral complex which contains the greater part of the matter which in general terminology is called « humus ». The fractionation by means of centrifuging liquid organic mixtures is easily and rapidly performed, and the amounts separated are usually very satisfactory.

A general acceptance of such a method would increase the precision of studies on the evolution of organic matter and its role in certain physical properties of soils.

ZUSAMMENFASSUNG

EINE DENSIMETRISCHE FRAKTIONIERUNGSMETHODE
DURCH ZENTRIFUGATION DER ORGANISCHEN BODENSUBSTANZ

Die densimetrische Fraktionierung der organischen Bodensubstanz erlaubt es die « freie » organische Substanz, hauptsächlich aus wenig evoluierten Produkten mit hohem C/N verhältnis und niedriger Wichte bestehend, vom organo-mineralischen Komplex mit dem grössten Teil dessen, was man geläufig als « Humus » bezeichnet, zu trennen. Eine solche Fraktionierung ist, wenn sie durch Zentrifugation in Mischungen organischer Flüssigkeiten geschieht, technich sehr leicht und rasch, In den meisten Fällen ist die Qualität der Trennung sehr zufriedenstellend.

Durch Verallgemeinerung einer solchen Methode würden die Untersuchungen über Evoluierung der org. Substanz und deren Rolle in bestimmten physikalischen Eigenschaften der Böden eine grössere Genauigkeit erfahren.

Фракционирование органического вещества почвы удельным весом и при помощи центрифугации.

Г. МОНИЕ, Л. ТЮРК и КОЛЕТТА ЖАНСОН-ЛЮЗИНАНГ.

Фракционирование органического вещества почвы удельным весом позволяет отделить от органическо-минерального комплекса содержащего большую часть того что принято обычно называть « гумусом », некоторые « свободные » органические вещества представляющие из себя плохо эволюционировавшие продукты с высоким соотношением C/N и небольшим удельным весом. Фракционирование это, произведенное при помощи центрифугации несложно в техническом отношении и занимает немного времени. Качество-же разделения — в большинстве случаев весьма удовлетворительно.

Распространение данного метода позволит достичь большей точности при изучениях эволюции органического вещества и его влияния на некоторые физические свойства почв.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

LEIN Z. Ja., 1940. Les formes de liaison de l'humus avec la partie minérale des sols. *Potchvovedénie*, **10**.

HENIN S., TURC L., 1949. Essai de fractionnement des matières organiques du sol. *C R. Acad. Agric.*, **35**, 41-43.

JEANSON LUUSINANG C., 1960. Fractionnement par densité de la matière organique des sols. *Ann. agron.*, **11**, 481-496.

Ann. agron., 1962, **13** (1), 65-88.

631. 473 (44)

LES SOLS DE LA RÉGION LORIENT-HENNEBONT, BELLE-ILE-EN-MER ET GROIX

M. COPPENET
avec la collaboration technique de Janine CALVEZ, Madeleine HELIAS, Éliane SPAGNOL
Station d'Agronomie, Quimper (Finistère).

SOMMAIRE

Entre la côte atlantique et une ligne parallèle située à 30 km à l'intérieur des terres, les sols sont formés sur granites, granulites, micaschistes et granulites schisteuses. La granulométrie des différentes formations est sensiblement identique et de type « granitoïde ». La méthode densimétrique utilisée pour ces déterminations a permis de tracer les courbes cumulatives caractéristiques.

Un aperçu pédologique de la région est donné. Les sols cultivés sont du type sols-bruns acides bien que la tendance évolutive générale soit la podzolisation. L'analyse chimique confirme les résultats déjà trouvés pour d'autres terroirs bretons : nécessité d'un chaulage bien contrôlé, grande pauvreté phosphorique, risques de carences cupriques et manganiques.

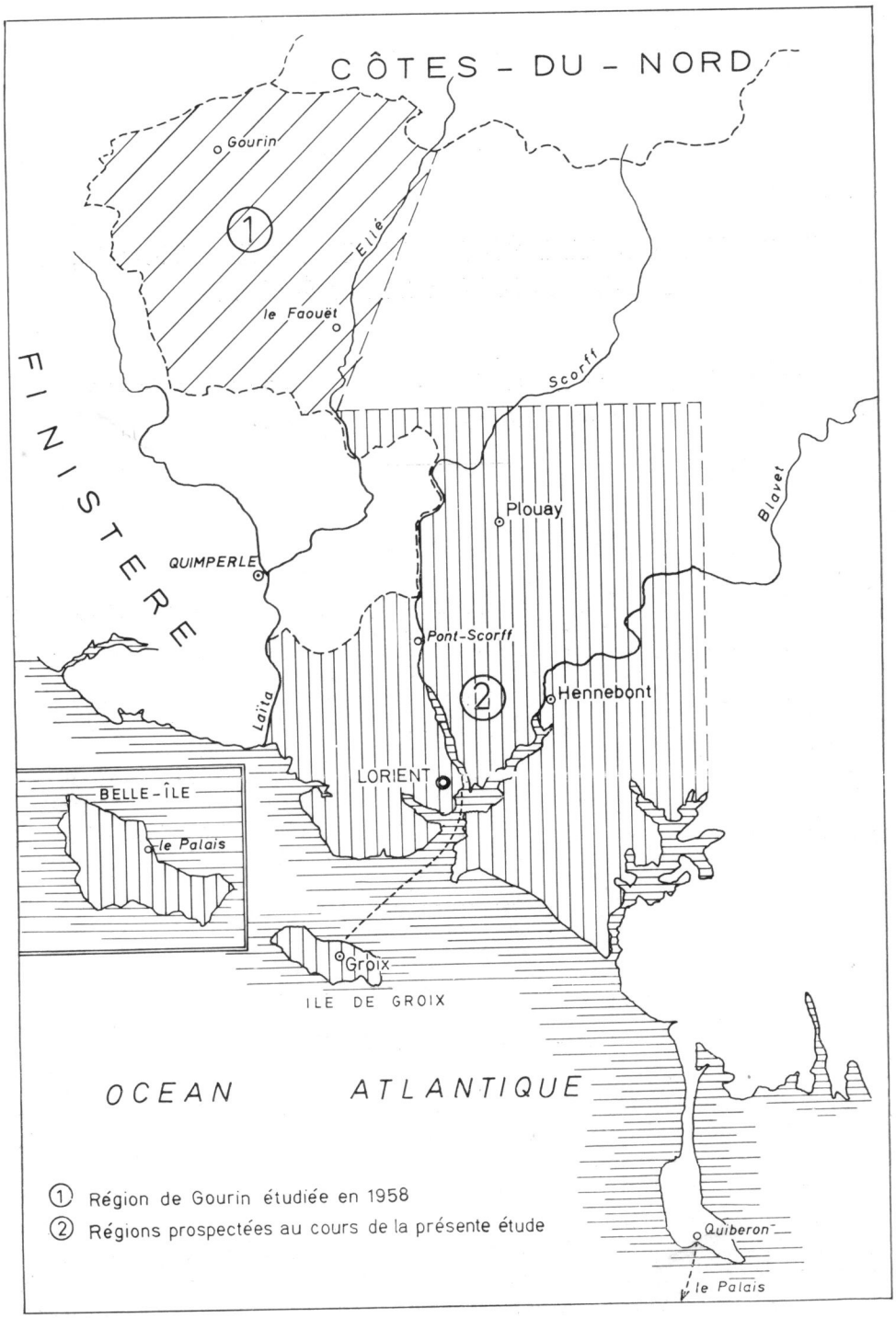
Les sous-sols des îles de Groix et de Belle-Ile-en-Mer sont constitués respectivement par les micaschistes et les phyllades de Saint-Lô sériciticques. Les humus naturels y ont des caractères d'acidité et de rapport C/N moins extrêmes que sur le continent et les terres cultivées y sont beaucoup moins riches en matières organiques. Les caractères chimiques ne présentent pas de particularités marquantes mais les carences de cuivre et de manganèse ne sont pas à craindre.

I. RÉGION DE LORIENT — HENNEBONT

A. — *Introduction . Situation*

Lors d'une publication antérieure, nous avons décrit, du point de vue pédologique et du point de vue agronomique, les sols de la région de Gourin (Morbihan). (COPPENET et HELIAS, 1958.)

La présente étude concerne la région de Lorient-Hennebont, c'est-à-dire une douzaine de communes du sud-ouest du département du Morbihan. La carte nº 1 situe l'aire englobée par ces deux monographies. La zone prospectée est limitée à l'ouest par l'estuaire de la Laïta, la limite administrative du département et le Scorff, au nord par les communes d'Inguiniel et Bubry, à l'est par les communes de Kergonan, Languidic, Brandérion, Nostang et la rivière d'Étel, au sud par l'Atlantique.


CÔTES - DU - NORD
Gourin
1
Ellé
le Faouët
FINISTERE
Scorff
Plouay
Blavet
QUIMPERLE
Pont-Scorff
2
Hennebont
Laïta
LORIENT
BELLE-ÎLE
le Palais
Groix
ILE DE GROIX
OCEAN ATLANTIQUE
① Région de Gourin étudiée en 1958
② Régions prospectées au cours de la présente étude
Quiberon
le Palais

Carte N° 1

M. GIOT, directeur du Foyer de Progrès Agricole d'Hennebont, nous a grandement facilité notre tâche, aussi nous tenons tout spécialement à le remercier ici. Les communes ayant donné lieu au plus grand nombre de prélèvements sont celles de Plœmeur, Guidel, Gestel, Caudan, Hennebont, Inzinzac, Calan, Plouay, Inguiniel et Languidic.

B. — *Géologie*

Du sud au nord, l'altitude de cette portion de pénéplaine s'élève progressivement. Les sommets atteignent, en effet, 30 à 40 m dans la commune côtière de Plœmeur, 70 à 80 m dans la région de Pont-Scorff et Hennebont, puis 150 à 170 m près de Plouay, Bubry, Inguiniel. Deux rivières côtières, le Scorff et le Blavet, drainent cette région par leurs cours inférieurs. Elles se réunissent à Lorient et forment le vaste bras de mer où s'abrite le grand port.

Les formations géologiques sont essentiellement constituées par six bandes parallèles à la côte atlantique et dirigées ouest (14° nord) à est (14° sud) (voir la carte n° 2).

1° *La granulite de Plœmeur.*

Cette roche présente des caractères assez constants d'un point à un autre et analogues à ceux des massifs granulitiques typiques déjà décrits en Bretagne. La granulite est à gros grains avec présence de deux micas mais prédominance de mica blanc. On n'observe pas de tendance au feuilletage. La kaolinisation est très poussée près du village de Plœmeur puisqu'on y trouve une importante exploitation de kaolin.

2° *Les micaschistes de Lorient.*

Ces micaschistes sont formés essentiellement de chloritoschistes feldspathiques.

3° *Le granite de Guidel, Gestel, Kervignac.*

Granite à grains très fins, le mica noir y domine mais est associé au mica blanc. Ce granite est analogue au granite de Vire, il constitue le granite dit « d'Hennebont » employé pour la confection de pavés.

4° *Les micaschistes granitiques de Pont-Scorff, Caudan, Hennebont.*

Roches gneissiques à faciès variés. On rencontre dans cette bande de nombreux petits massifs de granite ou de granulite non feuilletés.

5° *La granulite schisteuse de Plouay, Calan, Inzinzac, Languidic.*

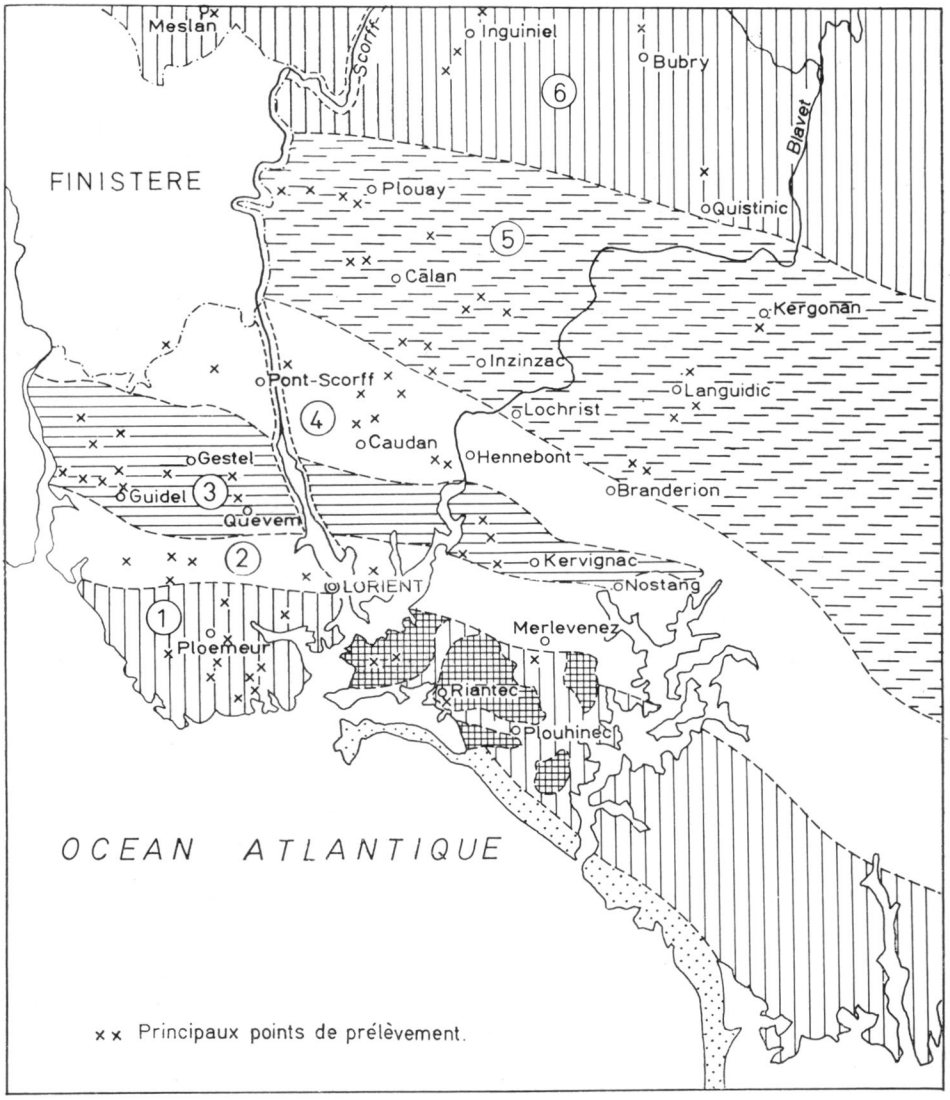
Roche compacte gneissique dans la région d'Inzinzac. Dans cette 5e bande, nous englobons également des zones situées en bordure où la granulite n'est pas schisteuse. D'autre part, la carte géologique mentionne une importante zone de schistes feldspathisés granulitiques à l'est et à l'ouest de Plouay. Nous n'avons pas trouvé ici, de sols différents du type granulitique habituel.

6° *Le massif granulitique de Meslan, Inguiniel, Bubry.*

Granulite non feuilletée, grenue, à gros grains de quartz, analogue à celle de Plœmeur dont nous venons de parler. Cette bande fait partie de la grande traînée granulitique allant de Quimper vers Baud et Pontivy.

Il faut signaler encore les zones côtières situées à l'est de la rivière de Lorient et constituées par du *Pliocène* (P_1 — sables et pouddingues), témoins d'un ancien

estuaire occupant les communes de Locmiquelic, Riantec, Plouhinec. La couche arable de ces régions renferme des cailloux roulés mais la granulite y affleure fréquem-



Carte n° 2 — Formations géologiques

1. — Granulite de Plœmeur.
2. — Micaschistes de Lorient.
3. — Granite de Guidel, Gestel, Kervignac.
4. — Micaschistes granitiques de Pont-Scorff, Hennebont.
5. — Granulite schisteuse de Plouay, Calan, Inzinzac.
6. — Granulite de Meslan, Inguiniel, Bubry.

ment dans les parties hautes. Au bord de la N 781, à l'embranchement de Locmiquelic, on peut observer une grande tranchée où le sous-sol est formé jusqu'à 2 m de profondeur par une argile rouge remplie de petits galets de quartz arrondis.

C. — *Pédologie*

De la côte atlantique à Plouay, la pluviométrie est comprise dans la zone 700 à 800 mm et la température moyenne annuelle entre 11 et 12°. Cette hauteur d'eau, inférieure à celle de la Bretagne intérieure, ne semble pas provoquer de différences sensibles dans l'évolution des sols.

Les roches cristallines et métamorphiques de la région étudiée ici sont riches en quartz et pauvres en bases solubles, l'acidité des sous-sols (Horizons C), où l'influence de la matière organique plus acide est faible, est de l'ordre de pH (H_2O) 4,5 à 5,0.

Les humus qui s'accumulent sous la lande à éricacées ou sous les conifères sont du type « Humus brut » ou « Mor » ; ceux qui s'accumulent sous les peuplements mixtes ou les feuillus sont du type « Moder » ou « Moder Mulliforme » (KUBIENA, 1953). Nous n'avons pas, à l'occasion de la présente étude, effectué une prospection pédologique détaillée, aussi nous nous contenterons de donner les grandes lignes de l'aspect des sols. Les deux types d'humus dont nous venons de parler sont différents morphologiquement mais ils présentent cependant les mêmes valeurs de pH et de rapport Carbone sur Azote :

pH (H_2O) = 3,8-4,0 ; pH (KCl 0,1N) = 3,0-3,3.
Rapport C/N généralement compris entre 20 et 25.

L'action podzolisante de ces humus présente probablement des dissemblances mais elle existe dans les deux cas et, à la base des horizons A, il est possible d'observer la présence de zones cendreuses plus ou moins étendues.

Les grands types de sols, dont nous dirons quelques mots, sont les suivants :

— Sols podzoliques,
— Rankers de sommets,
— Sols bruns podzoliques,
— Sols bruns-acides (sols cultivés),
— Sols hydromorphes.

Les podzols vrais n'ont pas été rencontrés car ils n'existent, généralement, que sur les grès, les quartzites ou les cailloutis. Dans les sols podzoliques, nous classons les profils avec un horizon A_2 cendreux d'une certaine importance : c'est le cas du profil bien visible à la sortie du nouveau pont de la D 162 sur la Laïta, côté Guidel. Voici la description :

Végétation — Pinus, Ulex, Erica — Pente faible.
0-25 — Horizon A_0-A_1 très noir d'humus type Mor ;
25-40 — Horizon A_2 beige clair avec présence de poches nettement cendreuses ;
40-80 — Horizon B de couleur rouille, graveleux à sa base ;
Au-delà de 80, les micaschistes plus ou moins altérés.

Les Rankers à profil AC ou Rankers d'érosion à humus brut sont présents sur tous les sommets de granite compact où la profondeur meuble n'est que de 20 à 50 cm. On les observe, en particulier, sur le front de nombreuses petites carrières à Guidel (granite) et à Plœmeur (granulite). Les sols bruns podzoliques n'ont pas d'horizon A_2 cendreux mais un horizon B de couleur rouille, légèrement enrichi en fer libre. Le lessivage de l'argile n'apparaît pas. Ils se forment sous la lande à éricacées, mais on peut les retrouver dans les parcelles de cultures abandonnées, leur horizon A plus

ou moins modifié par les façons culturales. Les sols cultivés les plus profonds sont situés sur des limons de colluvionnement, leur profondeur meuble dépasse rarement 1 mètre, ils ont les caractères de sols bruns-acides.

Dans la zone du granite de Guidel, on rencontre des sols enrichis en matière organique noire jusqu'à une profondeur de 50 et même 80 cm. Voici la description d'un profil situé à 1 km environ du pont du Bonhomme sur l'estuaire du Blavet, côté est (village de Kernours, près de Kervignac) :

Végétation — vieille prairie naturelle.

0-75 — Horizon noir humifère, toucher sableux;
75-100 — Horizon encore coloré par des traces d'humus;
100-125 — Horizon de teinte ocre;
125-150 — Horizon ocre clair à beige;
Au-delà de 150; les cailloux granitiques.

L'analyse donne les résultats ci-dessous :

Profondeur	pH	Argile	Limon	Sable grossier	Perte au feu
		%	%	%	%
0 — 25	4,80	9,5	14,5	35,4	9,08
25 — 50	4,85	11	14	37,4	6,45
50 — 75	4,85	11,5	15,5	36,1	6,06
75 — 100	4,95	6	18	36,1	4,54
100 — 125	4,95	2,3	16,5	34,8	3,86
125 — 150	4,95	2	13,5	44	3,4

Le pH est constant sur tout le profil avec toutefois une très légère acidification des horizons supérieurs due à l'abondance de la matière organique. Dans l'horizon 50-75 cm, la teneur en argile explique peut-être un faible lessivage mais au-delà de 75 cm, la chute du taux d'argile est compensée par un accroissement du limon, l'altération y étant moins poussée. Les sables grossiers (0,2 à 2 mm) sont très constants, sauf à l'approche de la roche-mère (125-150 cm).

Les sols hydromorphes apparaissent dans le fond des nombreuses petites vallées mais également dans les dépressions suspendues dès que l'écoulement tangentiel de l'eau n'est plus possible. On peut trouver des tourbes d'une profondeur de 1 m et plus ainsi que des sols à gley, la couche de gley se manifestant à partir de 20 ou 25 cm.

En dehors de ces derniers sols, influencés par la présence d'une nappe d'eau à faible profondeur, on voit donc que ce sont rarement des phénomènes pédologiques qui limitent les possibilités culturales.

D. — *Caractères physiques des sols*

L'analyse granulométrique a été effectuée par la méthode densimétrique proposée par Mme S. Mériaux et adaptée aux sols bretons par L. Duval (Mériaux, 1954 *a*; (Duval, 1959). Cette technique présente des avantages au point de vue manipulation. Elle permet de connaître les limons grossiers (20 à 50 μ) et de tracer la courbe cumulative mais elle donne des résultats inférieurs à la méthode pipette pour l'argile et les

limons. Au cours de nos précédentes études de terroirs, nous avions utilisé la pipette ROBINSON. Voici les résultats obtenus pour des échantillons de couche arable prélevés sur les différentes formations géologiques :

1° *Granulite de Plœmeur.*

Les moyennes pour 10 échantillons sont :

A = 7,9 p. 100 ; L = 19,2 p. 100 ; Lg = 18,15 p. 100 ; Sf = 14,2 p. 100 ; Sg = 23,9 p. 100. Perte au feu = 7,62 p. 100.

Les extrêmes pour l'argile sont 5 et 10 p. 100, pour le limon 15,3 et 17,5 p. 100, pour le limon grossier 14 et 20,8 p. 100. Ces résultats sont assez conformes à ceux d'autres régions granitiques où il apparaît une faible proportion d'argile et de limon, une forte proportion de sables grossiers et de matières organiques totales. Bien que n'ayant que cinq classes de particules, nous avons cependant tracé les courbes cumulatives comme proposé par Mme MÉRIAUX (MÉRIAUX, 1954 *b*). Sur le graphique G sont portées en 3 et 4 les courbes caractéristiques de deux sols formés sur granulite de Plœmeur.

2° *Micaschistes de Lorient.*

Huit échantillons seulement ont été analysés mais sur cette formation, nous trouvons des types assez différents du type granitique cité plus haut, c'est le cas des n° 5 et 6 portés sur le graphique G. A proximité de Lorient et au sud de Guidel existent des sols assez lourds par suite de teneurs plus fortes en argile et limon mais plus faibles en matières organiques (5,4 et 5,8 p. 100) :

n° 5 : A = 10 p. 100 ; L = 25 p. 100 ; Lg = 16,5 p. 100 ; Sf = 16 p. 100 ; Sg = 15,6 p. 100.

N° 6 : A = 15 p. 100 ; L = 23 p. 100 ; Lg = 19 p. 100 ; Sf = 17 p. 100; Sg = 12,6 p. 100.

Ces deux courbes prennent l'allure d'une courbe en S typique des sols schisteux.

3° *Granite de Guidel.*

Pour 20 échantillons, les moyennes sont les suivantes :

A = 9 p. 100 ; L = 16,5 p. 100 ; Lg = 13,75 p. 100 ; Sf = 12,33 p. 100 ; Sg = 30, 9 p. 100. Perte au feu = 8,54 p. 100.

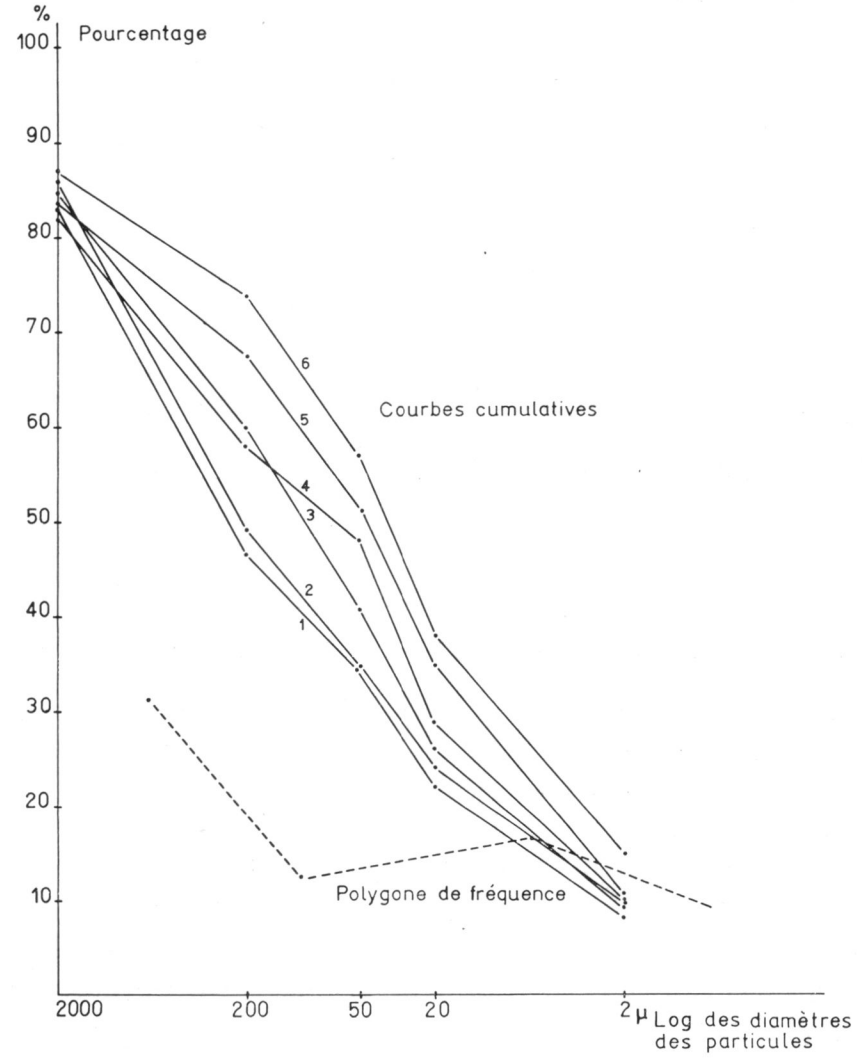
Les extrêmes pour l'argile sont 5,5 et 12,5 p. 100, pour le limon 12,2 et 20,8 p. 100, pour le limon grossier 11 et 19 p. 100. Pour deux sols de cette formation, il a été tracé les courbes 1 et 2 du graphique qui représentent bien les courbes cumulatives caractéristiques de ces sols granitoïdes. Elles présentent d'ailleurs une grande analogie avec celles qu'obtient Mme MÉRIAUX avec les granites du Morvan. D'une manière générale, tous les sols granitiques et métamorphiques de la région d'Hennebont inscrivent leur courbe cumulative entre les tracés 1 et 4 du graphique G. Le polygone de fréquence, tracé avec les chiffres moyens du granite de Guidel, est représenté en pointillé et montre bien l'importance de la fraction 200-2 000 μ.

4° *Micaschistes de Pont-Scorff-Hennebont*

Pour 7 échantillons, les moyennes donnent :

A = 10,4 p. 100 ; L = 14,9 p. 100 ; Lg = 11,35 p. 100 ; Sf = 12,78 p. 100 ; Sg = 35,7 p. 100.

L'abondance des sables grossiers est générale et ce type de granulométrie est encore très voisin du type granitoïde non métamorphisé.



Graphique G. Granulométrie des sols. Le type granitoïde est représenté par les courbes 1. 2. 3. 4.

5° *Granulite schisteuse de Plouay-Inzinzac.*

Dans cette zone, les analyses ne sont pas assez nombreuses pour distinguer la granulite schisteuse de la granulite non modifiée.

6° *Granulite de Meslan-Inguiniel-Bubry.*

Pour 10 échantillons, les moyennes donnent :

A = 10,2 p. 100 ; L = 17,78 p. 100 ; Lg = 17,5 p. 100 Sf = 9,57 p. 100 ; Sg = 23,12 p. 100, soit un type de granulométrie très voisin de celui rencontré à propos de la granulite de Plœmeur.

Humidité équivalente. — La capacité de rétention pour l'eau des sols granitiques, riches en matières organiques, est élevée puisqu'elle se situe aux environs de 30 p. 100 de la terre fine (méthode du vide de 40 cm de mercure pendant 30 minutes). Les sols nº 5 et 6, étudiés à propos des micaschistes de Lorient, sont moins bien pourvus en matières organiques, aussi, leurs humidités équivalentes respectives sont 21,1 et 25,7 p. 100. Les sols de Belle-Ile encore moins riches en matières organiques totales (4 p. 100) voient leur humidité équivalente tomber à 17 p. 100.

Stabilité structurale. — Le pourcentage d'agrégats stables > 0,2 mm a été déterminé par la technique de HENIN mais par tamisage à la main (HENIN, MONNIER, COMBEAU, 1958). Nous n'avons pas calculé l'indice S car les conditions dans lesquelles nous avons opéré sont susceptibles de s'éloigner par trop des normes d'emploi de l'appareil à tamiser (FEODOROFF, 1960). Les pourcentages d'agrégats restés sur le tamis sont de toute façon élevés puisque dans nos conditions et, pour les sols granitoïdes, ils sont de 45, 50 et même 60 p. 100, le total Argile + limon sans dispersant restant voisin de 5 p. 100. Ces chiffres sont valables aussi bien pour le prétraitement à l'air que pour les prétraitements à l'alcool et au benzène.

Les sols des micaschistes de Lorient et ceux de Belle-Ile ont une stabilité beaucoup moins bonne, l'influence de la teneur en matières organiques étant prépondérante.

E. — *Caractères chimiques des sols*

Les analyses chimiques, effectuées sur les sols de la région d'Hennebont, ne donnent pas des résultats différents de ceux obtenus pour d'autres régions de l'ouest de la Bretagne. La valeur chimique sera donc sensiblement la même qu'à Loguivy-Plougras (C.-du-N.) (ROBELIN, COPPENET et HELIAS, 1957) ou à Gourin (Morbihan) (COPPENET et HELIAS, 1958).

pH et besoin en chaux. — Nous savons que le pH (H2O) des humus de landes et de forêt est voisin ou légèrement inférieur à 4, le rapport terre sur eau étant égal à 1/2,5 et l'agitation maintenue pendant la durée de la mesure au pH mètre à électrode de verre. Le pH des couches arables des parcelles maintenues sans amendement calcaire est voisin de 5, 5,2, celui des parcelles chaulées peut s'élever jusqu'à 6,5.

Le « besoin en chaux » déterminé par la méthode de KAPPEN (KAPPEN, 1929), pour les sols n'ayant jamais reçu d'amendement calcaire, se situe aux environs de 5 tonnes CaO par hectare. Nous savons, par expérience, que cette dose de chaux n'amènera pas le pH à la neutralité mais seulement entre 6 et 6,5 ce qui est d'ailleurs préférable.

La méthode proposée par F. GUITIAN-OJEA a été expérimentée, *in vitro*, sur un certain nombre de sols et nous avons pu constater qu'elle donnait des résultats très précis (GUITIAN-OJEA et MUÑOZ-TABOADELA, 1957). Cette méthode nécessite seulement deux mesures de pH, l'une dans ClK décinormal, l'autre dans une solution tampon de paranitrophénol en présence de ClK. Elle permet donc un travail facile pour de grandes séries. A l'aide d'une abaque, on calcule la quantité de chaux à apporter sur un hectare de terre pour amener le pH à la valeur désirée entre pH (KCl) 5 à 7.

Acide phosphorique assimilable. — Les parcelles cultivées ont des teneurs en P_2O_5 citrique réparties entre 0,050 et 0,300 p. 1 000 suivant les fournitures d'engrais

phosphatés au sol. La majorité des teneurs est, cependant, voisine de 0,100 p. 1 000, ce qui souligne le rôle important que doivent jouer les engrais phosphatés dans la fertilisation.

Potasse échangeable. — Les teneurs en K_2O échangeable sont souvent à peine supérieures à 0,100 p. 1 000. Elles sont même inférieures à 0,100 p. 1 000 dans certaines landes et dans les exploitations à bilan potassique négatif. Les parcelles les mieux entretenues en engrais potassiques ou ayant reçu des goemons ont des teneurs supérieures à 0,200 p. 1 000.

Manganèse actif. — Au cours de nos prospections, les symptômes de carence en manganèse sur céréales ont été notés à Caudan et à Bubry en particulier. Comme cela a été bien établi dans le Finistère, cette carence est à craindre, surtout dans les régions granitiques et métamorphiques, dès que le pH s'élève au-dessus de 6. Dans ces zones « Mn actif », dosé par la technique rapide de BITTEL, est souvent inférieur à 20 p.p.m. alors que cinq échantillons prélevés sur micaschistes de Lorient donnent : 47,5 ; 58,5 ; 61 ,5 ; 82,5 ; et 93 p.p.m. (COPPENET, 1959).

Cuivre total. — De graves carences cupriques ont été décelées à Caudan sur céréales, aussi il en existe certainement d'autres dans l'étendue du massif granulitique de Meslan, Inguiniel, Bubry, sur le granite de Guidel, Gestel, Kervignac ou sur la granulite de Plœmeur.

Les dosages de cuivre total, effectués sur les échantillons ayant servi aux analyses granulométriques, donnent les chiffres suivants :

	Moyenne	Extrêmes
Granulite de Meslan, Inguiniel	5,95 p.p.m.	4 et 8,5 p.p.m.
Granulite de Plœmeur	8,6 —	4 et 15 —
Granite de Guidel, Gestel	16,3 —	8 et 20 —
Micaschistes de Lorient	22,8 —	7,5 et 39 —

De plus, certains sols d'Inzinzac (granulite schisteuse) et de Pont-Scorff (micaschistes granitiques) contiennent moins de 8 p.p.m. de Cu total.

Ces divers sols, provenant de parcelles cultivées, peuvent être plus ou moins enrichis en cuivre par les pratiques culturales mais les teneurs reflètent, néanmoins, assez nettement l'influence de la roche-mère : 5,95 p.p.m. est inférieur au seuil de carence fixé à 7-8 p.p.m. ; 8,6 p.p.m. est à peine supérieur à ce seuil mais 22,8 p.p.m. est la teneur normale d'un sol sur roches sédimentaires. (COPPENET et Mme J. CALVEZ, 1956.)

F. — *Conséquences agronomiques*

De la côte lorientaise à la région de Meslan-Inguiniel-Bubry, les sols sont formés sur des roches granitiques ou sur des roches métamorphiques (micaschistes, granulites schisteuses). Le relief est tourmenté, les terres cultivées sont assez variables en profondeur meuble. Sur les sommets la roche-mère compacte apparaît à 20 ou 50 cm, sur les pentes les limons de colluvionnement atteignent 80 à 100 cm d'épaisseur parfois 120 cm. Lorsque l'on creuse un trou de sondage les fragments de roches appa-

raissent, en général, vers 1 m de profondeur, c'est le début de l'arène très variable en importance.

Sur les six formations étudiées, cinq ont des granulométries très voisines du type que l'on pourrait appeler « granitoïde ». Les courbes cumulatives correspondantes sont assez caractéristiques et tracées sur le graphique G sous les nº 1, 2, 3 et 4. La sixième formation est celle des micaschistes de Lorient (courbes 5 et 6) avec des sols mieux pourvus en éléments fins donnant de bons sols de culture.

Le type « granitoïde » a peu d'argile, peu de limon, la profondeur meuble est souvent faible mais la capacité de rétention pour l'eau et les cations est bonne grâce à l'abondance des colloïdes humiques. La présence d'une forte proportion de graviers et de sables grossiers en fait des sols très filtrants et jamais battants. Le climat hivernal relativement doux permet de les travailler en toutes saisons.

Les parcelles cultivées, de bonne profondeur, peuvent prétendre à d'assez fortes potentialités culturales.

Les phénomènes pédologiques de lessivage et de podzolisation ne limitent jamais les rendements, par contre, des surfaces assez importantes sont soumises à l'hydromorphie et posent des problèmes d'abaissement du plan d'eau : sols à gley, tourbières.

L'humus très acide et très abondant de type « Mor », présent dans les landes au moment de la mise en culture, évoluera favorablement avec abaissement de son rapport C/N et formation d'acides humiques liés à l'argile, si on le divise finement et, bien entendu, si on relève son pH. Les houes rotatives du type Rotavator, très répandues actuellement, faciliteront beaucoup ce travail.

Au point de vue chimique les sols de roches-mères acides seront pauvres en bases facilement solubles et en acide phosphorique, c'est le cas des diverses formations étudiées ici. L'exploitant agricole devra d'abord se préoccuper de l'état calcique conditionnant toute l'alimentation minérale. C'est la détermination du pH et du « besoin en chaux » qui sera le guide le plus sûr dans ce domaine et, qui dira, s'il y a lieu d'envisager un chaulage de fond ou seulement un chaulage d'entretien. Le choix de l'amendement calcaire se fera en fonction des conditions économiques mais les amendements marins, étant donné la proximité du rivage, auront la faveur de nombreux cultivateurs. Le trez fin ou sable coquillier a une action assez rapide et comparable à celle des calcaires broyés tandis que le maërl, beaucoup plus grossier, agira moins vite, ce qui n'est pas un grave inconvénient, mais apportera en plus une quantité non négligeable de magnésie.

En zone granitique, il faut penser aux déficiences cupriques possibles, surtout au moment des mises en culture. Cette carence est suffisamment grave pour empêcher toute culture de céréales autre que le Seigle, de Trèfle violet ou de petits pois, mais un seul enfouissement de 25 à 30 kg/ha de sulfate de cuivre y remédiera pour de longues années. En toutes régions, la carence en manganèse peut occasionner des chutes de rendement graves chez les céréales, si le pH de la couche arable s'élève au-delà de 6. On y remédiera d'abord, en arrêtant tout apport de calcaire puis, en pulvérisant chaque culture de céréales avec 600 l/ha de solution de sulfate de manganèse à 0,5 p. 100. Remarquons, à ce propos, que les terres bien tassées au moment du semis verront leur déficience manganique atténuée.

Un élément majeur des plus important et qui fait défaut dans tous les types de sols bretons est l'acide phosphorique. L'analyse chimique sera, là aussi, à la base de tout plan de fumure rationnel, le choix de l'engrais phosphaté se faisant en fonction

de la dose nécessaire et de l'époque de l'année. Il s'agit, en effet, de concilier les formes économiques et peu solubles à apporter en forte dose et les formes plus coûteuses et solubles réservées aux premiers stades de croissance d'une culture.

La potasse ne sera jamais négligée car les sols ne sont pas originellement riches en potasse échangeable et les entraînements par les eaux de drainage sont susceptibles d'être sérieux.

L'entretien du bilan humique ne semble pas poser de sérieux problèmes étant donné le type de culture pratiqué, la réserve de matière organique existant et le climat peu favorable à sa destruction accélérée.

Les sols, ainsi amenés à un état convenable aux points de vue calcique, phosphorique et potassique, seront alors susceptibles de produire de bonnes et mêmes de très bonnes récoltes d'ordre divers à la condition de se servir judicieusement des engrais azotés minéraux, toujours indispensables aux fortes rentabilités.

II. BELLE-ILE-EN-MER

Belle-Ile, située à 12 km de la pointe de la presqu'île de Quiberon, est en réalité à 25 km au large de la côte du Morbihan. L'île constitue un canton de quatre communes d'une superficie totale de 8 290 hectares pour une population actuelle de 4 900 habitants. La population totale était de 10 000 habitants en 1886, elle a diminué de la moitié depuis cette époque mais la chute de la population agricole a été la plus importante. Il reste 200 exploitants agricoles à Belle-Ile et la Direction des Services Agricoles du Morbihan se préoccupe activement de leur sort. Un conseiller agricole, M. LAUDRIN, est en place sur l'île et un concours de bonne tenue d'exploitation s'y est tenu en 1960 (KUNTZ, 1960.)

A. — *Géologie*

Belle-Ile est constituée par un plateau de « *Phyllades de Saint-Lô séricitiques* » dominant l'Océan de quelques cinquante mètres et limité le plus souvent par des falaises abruptes de 15 à 30 mètres de hauteur. Cette variété de phyllades est spéciale à Belle-Ile et en constitue la quasi-totalité du sous-sol. Les schistes bleuâtres ou gris de plomb dans les falaises apparaissent, à faible profondeur, d'une couleur brun-rougeâtre sur de nombreuses coupes de terrain. Leur schistosité est ridée et ondulée comme de petites vagues figées avec, entre les strates des lentilles de quartz très abondantes. Les géologues estiment ce quartz à un dixième du volume total de l'île, (Carte Géologique au 1/80 000). L'agronome est frappé par l'abondance des cailloux de quartz anguleux ou plus ou moins émoussés qui jonchent la surface des parcelles cultivées.

La carte géologique signale, en outre, une lentille pliocène (Pb) à l'ouest de Locmaria, une petite zone de dunes calcaires (A) et de petites languettes de schistes et gneiss granulitiques près de certains points des côtes.

Au point de prélèvement n° 18, situé dans la zone pliocène, nous avons effectivement constaté la présence de petits cailloux roulés. Nos prélèvements n° 22-23-24 proviennent de la zone des dunes calcaires. Quant aux filons de schistes et gneiss granulitiques, ils ne présentent aucune importance agronomique.

B. — *Pédologie*

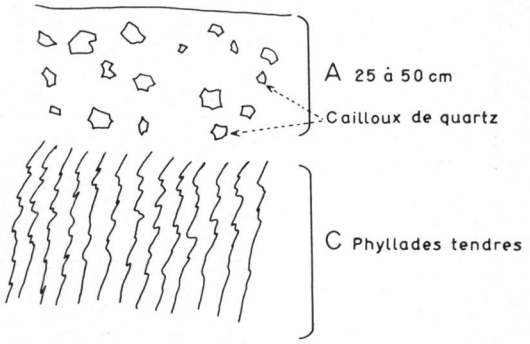
Les sols cultivés examinés au cours de nos prospections sont du type « sol brun » ; aucune évolution pédologique n'a été décelée. Voici la description d'un profil fréquemment rencontré :

-0-25 cm ou 0-50 cm : horizon A ou horizon de culture. Cet horizon est de type limoneux avec abondance de cailloux de quartz anguleux.

Sous une vieille luzernière, l'enrichissement en matière organique donne une bonne structure grumeleuse alors que la plupart des terres cultivées ne contenant que 1,5 p. 1000 d'azote total ont une structure moins bonne.

Au delà de 25 ou 50 cm : on passe, sans transition, à l'horizon C constitué par des schistes mous, décomposés sur place, de couleur brun-rouge (voir dessin D).

Il convient de remarquer que Belle-Ile est située dans l'une des zones les moins pluvieuses de Bretagne : 524 mm en moyenne pour la période 1851-1900, et que la température moyenne annuelle est supérieure à celle du continent voisin.



Dessin D. Profil caractéristique des sols de Belle-Ile

La matière organique des sols semble s'y détruire plus rapidement et les humus accumulés sous la lande à éricacées présentent des caractères moins extrêmes. Pour huit parcelles de lande, les pH sont compris entre 3,9 et 4,5 les rapports C/N entre 17 et 18.

C. — *Caractères physiques des sols*

Le tableau 1 nous donne la composition granulométrique d'une vingtaine de terres récoltées au cours d'une tournée de prospection dans l'île.

Nous avons signalé la présence de cailloux de quartz abondants, dans les parcelles cultivées, aussi, le pourcentage de terre fine est-il, en général, faible et souvent inférieur à 75 p. 100. La teneur en argile est faible et fréquemment voisine de 7 ou 8 p. 100 sauf sur la ferme du Bruté où elle atteint et dépasse 15 p. 100. Par contre, la proportion de limon est voisine de la proportion trouvée dans les terres du continent étudiées dans la région d'Hennebont (15 à 20 p. 100) mais les limons grossiers (20 à 50 μ) sont abondants et dépassent souvent 25 p. 100. Le sable grossier est plutôt faible et compris entre 10 et 20 p. 100 aussi sommes-nous en présence de sols riches en éléments fins inférieurs à 50 μ. La proportion de matière organique des sols cultivés est très inférieure à celle du continent aussi, leur structure est-elle beaucoup moins stable, nous en avons dit un mot précédemment.

TABLEAU I

Terres de Belle-Ile-en-Mer

Analyses physiques

N°	Origine des échantillons	Terre fine %	Pour cent de terre fine					
			Argile	Limon	Limon grossier	Sable fin	Sable grossier	Perte au feu
1	Brute, parcelle blé (0-20 cm)	88	16	24	24,9	25,5	16,8	6,4
2	Brute, sous-sol (25-50 cm)	87,5	50	16	13	14,1	9,6	5
3	Brute, dactyle trèfle b. (0-15 cm).....	95	15	27	27	14,3	5,7	6
4	Brute, verger pommiers (0-20 cm).....	87,7	14,5	24,5	24	14,3	8,9	6,7
5	Deuborc'h en Sauzon, vielle prairie. ...	95	10	23	24	18,4	14,5	5,3
6	Borstang, M. LOREAL, essai blés	83	8	13	24,5	16,4	7,6	4,2
7	Bordeneo, M. GUILLAUME, fétuque	75	7	17	21	24,3	20,9	4,5
8	Bordeneo, M. GUILLAUME, Orge	91	7	17	26	26,3	13,1	8
9	Profil sous vieille luzerne (0-25 cm)..	69	4,5	29,3	24,2	15,4	20,3	10
10	Schistes ± décomposés (25-75 cm) ..	24	9	27	15,8	12,8	33,1	4,8
11	Maison-Neuve, betteraves	72,5	8	18	26	24,5	10,1	4,6
12	Maison-Neuve, tranchée route (30-60 cm)	72,5	14,3	23	22,8	19	11,4	3,9
13	Kergallic en Bangor, M. LE GALLIARD, blé	71	6	17	30	22	11,6	4,2
14	Kergallic en Bangor, M. LE GALLIARD, luzerne, 2e année	71,5	8	17	28	23,8	12	4,4
15	Kergallic en Bangor, M. LE GALLIARD, terre abandonnée	69	4	15	26,5	25,1	14	4
16	Le Squeul en Locmaria, vesce-avoine...	75,5	8	15,8	23,5	19,1	20,5	4,4
17	Le Squeul en Locmaria, blé	75,5	11	13,8	27,7	20	15,8	5,5
18	Borvran en Locmaria, sommet, blé.....	69	10,2	21,8	20	18,9	10,1	9,1
19	Kerdavid, choux semés	92	4,2	15,3	26,5	28,3	12,4	2,8
20	Antoureau, M. SAMSON, jardin	90,5	13	22	18,1	20,8	17,8	6,4
21	Antoureau, M. SAMSON, champ de blé .	74	8	17,5	27	22,9	12,2	4,3

La capacité de rétention pour l'eau est faible si on la compare à celle des sols granitiques de la région d'Hennebont :
Humidité équivalente pour cent de terre fine.

N° 6 = 17,2
N° 14 = 17
N° 16 = 17,7

Ces chiffres reflètent, naturellement, les faibles teneurs des sols de Belle-Ile en argile et en matières organiques.

D. — *Caractères chimiques des sols*

Si les terres abandonnées sous la lande à éricacées voient leur pH s'abaisser jusqu'aux environs de 4 à cause de l'humus qui s'accumule, la plupart des sols cultivés présentent un pH compris entre 6 et 7, le calcaire étant absent ou présent à l'état de traces. Plusieurs parcelles analysées ont des pH supérieurs à la neutralité et les sols calcaires voisins de la grève de Donnant accusent jusqu'à 55 p. 100 de carbonate de chaux avec un pH supérieur à 8.

Les teneurs en acide phosphorique assimilable (méthode citrique) sont uniformément faibles ou très faibles sauf dans les champs ayant reçu de bonnes doses d'engrais phosphatés où elles deviennent bonnes (Bruté, Kergallic). La terre n° 20 du village d'Antoureau, provenant d'une exploitation maraîchère, est très riche en acide phosphorique assimilable. L'échantillon n° 3 de la ferme du Bruté, prélevé assez superficiellement, voit sa teneur exagérée par les engrais phosphatés épandus en couverture.

Les teneurs en potasse échangeable, sont fréquemment inférieures à 0,2 p. 1 000 parfois mêmes inférieures à 0,1 p. 1 000. Les feuilles de Pommiers, observées au verger du Bruté en juillet 1960, présentaient des nécroses marginales dues à la carence potassique (terre n° 4, teneur en K_2O échangeable 0,095 p. 1 000).

Le sodium échangeable, exprimé en Na_2O, a été déterminé sur quelques échantillons. Les sols finistériens contiennent entre 10 et 100 mg/kg de Na_2O échangeable avec une moyenne située vers 40 mg/kg soit, moins de 0,1 milliéquivalent de Na pour 100 g de terre fine. Les chiffres trouvés à Belle-Ile ne sont jamais inférieurs à 80 mg/kg Na_2O et s'élèvent au-delà de 200 mg pour les échantillons n° 5, 16 et 24. Ces trois derniers échantillons, prélevés à quelques centaines de mètres du rivage, ont probablement été enrichis en chlorure de sodium par les embruns susceptibles d'arriver jusque-là par gros temps, mais ils ne sauraient présenter de toxicité vis-à-vis des cultures.

Manganèse actif. — Les teneurs sont suffisantes, d'autre part les sols étant faiblement pourvus en matières organiques, il ne semble pas y avoir de risques de carence manganique malgré des pH supérieurs à 6. Les échantillons n° 3 et 7 contiennent cependant une quantité de « manganèse actif » (17 p.p.m.) située au niveau du seuil de carence.

Cuivre total. — Dans l'ensemble le cuivre est assez abondant pour empêcher toute carence chez les plantes sensibles. Les n° 14, 15 et 19 sont situés à proximité du seuil de carence (8, 6,5 et 8 p.p.m.), aussi y aura-t-il lieu de penser aux compléments cupriques dans le cas de mise en culture de landes.

TABLEAU 2

Terres de Belle-Ile-en-Mer

Analyses chimiques

N°	Origine des échantillons	pH	CO_3Ca %	Azote ‰	P_2O_5 citrique mg/kg	K_2O échangeable mg/kg	Na_2O échangeable mg/kg	Mn actif mg/kg	Cu total mg/kg
1	Brute, parcelle blé (0-20 cm)	7,4	traces	2,3	234	189	119	24	16
2	Brute, sous-sol (25-50 cm).....	5,5	0	0,2	42	101	119		6
3	Brute, dactyle trèfle b. (0-15 cm)....	7,8	traces	1,96	420	108	102	17	14,5
4	Brute, verger pommiers (0-20 cm)...	6,7	0	2,28	199	95		25	25
5	Deuborc'h en Sauzon, vieille prairie ...	7	0	1,7	56	217	389	58	15,5
6	Borstang, M. LOREAL, essai blés	6,4	0	1,6	104	159	81	22	18,5
7	Bordeneo, M. GUILLAUME, fétuque ..	6,9	traces	1,62	111	167		17	16
8	Bordeneo, M. GUILLAUME, Orge	6,4	0	1,5	86	137		105	
9	Profil sous vieille luzerne (0-25 cm)....	7,4	traces	3,3	84	60	119	72	40
10	Schistes ± décomposés (25-75 cm)...	7,75	traces	1,0	18	38			38,5
11	Maison-Neuve, betteraves	6,1	0	1,68	88	233	97	56	13
12	Maison-Neuve, tranché route (30-60 cm)	8	traces	1,14	39	80	130		15
13	Kergallic en Bangor, M. LE GALLIARD, blé	6,4	0	1,44	221	144		58	12
14	Kergallic en Bangor, M. LE GALLIARD, luzerne 2e année.....	6,8	traces	1,36	333	127		123	8
15	Kergallic en Bangor, M. LE GALLIARD, terre abandonnée.....	5,9	0	1,2	32	102			6,5
16	Le Squeul en Locmaria, vesce-avoine..	7,5	traces	1,45	72	264	210	34,5	12,5
17	Le Squeul en Locmaria, blé	8,1	2,2	1,45	97	277			10
18	Borvran en Locmaria, sommet, blé ..	6,65	0	1,94	122	332	119	27	11
19	Kerdavid, choux semés.....	5,5	0	0,95	40	127			8
20	Antoureau, M. SAMSON, jardin	7,7	11,6	2,55	491	345			33
21	Antoureau, M. SAMSON, champ de blé..	6,1	0	1,37	173	72			11
22	Kerhuel en Sauzon, choux.....	8,2	25	1,21		119	184		32
23	Kerhuel en Sauzon, bas du champ (sableux	8,1	55,4	1,1		81			12
24	Kerhuel en Sauzon, champ de blé près la plage de Donnant	8,5	38,4	1,17		110	213		11

E. — *Conséquences agronomiques*

Les sols de Belle-Ile sont peu profonds, caillouteux, gorgés d'eau en hiver, durs en été. Leurs qualités physiques sont donc assez défavorables. L'analyse a montré qu'ils sont, en général, très pauvres en argile mais normalement pourvus en limon et bien pourvus en limons grossiers. Il n'y a donc rien à attendre au point de vue structure, de l'élévation de leur pH.

Par contre, ils sont assez faiblement pourvus en humus et les amendements humiques seront fortement à conseiller. Il y aura lieu de veiller à ne pas provoquer une destruction trop rapide de la matière organique par des chaulages exagérés et la prairie temporaire sera la bienvenue.

Un pH de la couche arable voisin ou légèrement supérieur à 6 est souhaitable, aussi les parcelles anciennement cultivées ne recevront d'amendements calcaires que sous la condition d'une analyse ayant relevé une réaction nettement acide.

Pour la mise en cultures de landes d'éricacées à humus abondant et très acide (pH 4), il faut, bien sûr, prévoir des doses d'amendements calcaires de l'ordre de 2 tonnes CaO /ha. Belle-Ile doit contribuer à sa propre calcification puisque plusieurs grèves fournissent un sable bien pourvu en calcaire :

1)	plage de Donnant (en face de la grotte de Ker Toul)	: 45 p. 100 CaO
1*bis*)	dunes de Donnant (à gauche, à la limite de la route goudronnée)	: 44 —
2)	Bordardoué (sable fin)	: 45 —
2*bis*)	Bordardoué (sable grossier + maërl)	: 38 —
3)	Grands-Sables (maërl)	: 40 —
3*bis*)	Grands-Sables (sable fin)	: 32 —
4)	plage de Deuborck	: 22 —
5)	Port-Jean	: 22 —
6)	Ster-Vras	: 5 —

L'équivalent de 2 tonnes CaO peut ainsi être apporté avec 4 tonnes environ des trois premiers sables, mais avec 8 tonnes des sables 2 *bis* et 3 qui, beaucoup plus grossiers, agiront beaucoup moins vite

Plus grave est le problème acide phosphorique. La plupart des parcelles cultivées doivent recevoir de fortes doses d'engrais phosphatés. Ce problème n'est d'ailleurs pas, techniquement, différent de celui qui se pose sur le continent mais, ici, des frais de transport supplémentaires viennent s'ajouter et compliquent la tâche des Belle-Ilois.

La fertilisation potassique sera basée essentiellement sur la compensation des exportations variant suivant le type d'assolement et de production.

Les oligo-éléments ne semblent pas être préoccupants, tout au moins, dans l'immédiat.

M. KUNTZ, directeur des Services agricoles du Morbihan écrit :

« Il faut axer productions et élevage pour une vente de fin juin à septembre afin d'offrir ce que Belle-Ile importe à grand frais pour tous ses estivants : légumes frais, fruits d'été, agneau, veau, poulet, porc, bovins, produits laiters ». (KUNTZ, 1960.)

Ces spéculations demandent une production végétale essentiellement à base de prairie temporaire et de fourrages annuels et ce sont justement ces cultures qui donne-

ront les meilleurs résultats dans les conditions de Belle-Ile. La fréquence de la prairie temporaire présentera encore un autre avantage, celle d'enrichir les sols en matière organique et d'améliorer leur structure. On fera appel, le plus souvent possible, aux légumineuses, dans le but d'économiser les engrais azotés minéraux, mais l'agriculture ne trouvera vraiment la place qui lui revient que s'il lui est possible d'employer rationnellement les engrais minéraux et au premier chef les engrais phosphatés.

III. ILE DE GROIX

L'île de Groix est située à environ six kilomètres de la côte, au large de l'embouchure de la rivière de Lorient et, à 50 minutes de bateau de cette dernière ville. Sa superficie est plus réduite que celle de Belle-Ile puisqu'elle n'est que de 1 476 hectares. La superficie cultivable s'élève à 600 hectares mais le nombre de propriétaires (1 080) reste un obsctacle majeur à la mise en valeur de l'île malgré un remembrement qui a diminué le nombre des parcelles de 39 000 à 2 000. Le nombre des exploitations agricoles valables n'est guère que de sept pour une population totale de 3 800 habitants qui augmente de 1700 âmes pendant la saison touristique. Les problèmes d'orientation de la production agricole seront donc très voisins de ceux de Belle-Ile.

A. — *Géologie. Pédologie*

L'île est formée par une bande de roches métamorphiques : *les micaschistes à chloritoïde*. Dans ces micaschistes existent de nombreux filons d'amphibolites à Glaucophane riches en minéraux rares. On observe très bien ces filons verdâtres, à l'est de l'île, dans les hautes falaises du fort de Surville qui surplombent la plage des Grands-Sables. Dans divers points et, en particulier, près de la Pointe-des-Chats, on trouve des schistes présentant de beaux nodules de grenat. Comme à Belle-Ile, les sols de Groix ne présentent pas d'évolution pédologique marquée. L'île est située dans la zone pluviométrique 6 à 700 mm et les humus naturels présentent des caractères moins extrêmes que sur le continent. L'humus de la lande d'ajonc n° 1 a un pH égal à 4,35 avec un C/N de 15,7. L'humus de la lande d'éricacées n° 3 a un pH égal à 4,6 avec un C/N de 16,5, le sol est un Ranker sur micaschistes, la profondeur meuble n'étant que de 25 cm. Ces types d'humus seraient des Moder ou des Moder-mulliformes (KUBIENA, 1953) dans lesquels on reconnaît des grains de sable non enrobés.

B. — *Caractères physiques des sols*

La profondeur meuble est toujours faible car l'on rencontre la roche compacte entre 30 et 80 cm suivant la position topographique.

Le tableau 3 donne les résultats de l'analyse granulométrique de 19 échantillons de couche arable provenant de stations réparties sur l'ensemble du territoire.

Les graviers et petits cailloux de quartz sont présents en quantité normale puisque la proportion de terre fine est souvent voisine de 90 p. 100.

TABLEAU 3

Terres de l'île de Groix

Analyses physiques

N°	Origine des échantillons	Terre fine %	Pour cent de terre fine					
			Argile	Limon	Limon grossier	Sable fin	Sable grossier	Perte au feu
1	Glavezic, lande d'ajoncs	86,5	12	16,5	10,5	9,75	19,75	19,4
2	Kervedan, non cultivée	87,5	12,5	16,5	17	17,5	21,4	7
3	Port-Melin, lande de bruyères et ajoncs		18,5	18,5	12	8,35	19,45	13,6
4	Pradino, non cultivé, fétuque, agrostis, houque	91	11	16,5	10	11,8	25,8	8,25
5	Kerlivio, non cultivé, dactyle	97,5	10	16,5	23	15,9	13,75	5,15
6	Pointe-des-Chats, terre abandonnée	90	9,5	13,5	14	15,0	28,2	5,25
7	Port-Melite, terre abandonnée, dactyle	68,5	12	16	9,5	19,25	30,7	4,65
8	Locmaria, terre abandonnée	91	13,5	13,5	13	10,3	31,8	7,7
	Parcelles cultivées :							
9	M. COUDRAY, Toul pris	91	9,8	19,7	20,5	18,45	17,2	4,5
10	M. ROMIEUX, près du bourg	86,5	8,9	19,1	19,5	20,9	18,5	5,1
11	M. LE CORRE, Locmaria	87	9,5	11,5	17	27,85	20,8	3,35
12	M. ARIVEL, Kermarec	82	11	14	12	29,4	27,25	5,5
13	M. ARIVEL, Lomener	86	12	18	17,2	22,9	18,65	4,8
14	M. POSSEME, Kerbus	91	13	18	18	18,9	14,35	8,8
15	M. POSSEME, Kerlo	93,5	9	21	22	20,1	11,0	3,85
16	M. POSSEME, Kerlo, en ray-grass	86	12,5	14	22	14,5	21,6	4,8
17	M. POSSEME, Kervilio	92	9	19,2	23,3	18,7	15,8	4,1
18	M. POSSEME, entre Kerlo et Kerlivio	98	7,5	18,7	24,3	21,6	15,0	3,9
19	M. POSSEME, Apéritif	87	9,5	15,5	28	21,6	25,8	4,8

Les moyennes arithmétiques des 19 déterminations sont les suivantes :

	%
Argile	11,08
Limon	16,7
Limon grossier	17,5
Sable fin	18,03
Sable grossier	20,8

Ce type de répartition granulométrique est très voisin de celui que nous venons d'étudier à propos des sols métamorphiques et granitoïdes de la région d'Hennebont : peu d'argile et d'éléments fins, abondance des sables grossiers. La perte au feu n'est que de 4 p. 100 environ pour les parcelles cultivées et l'indice d'instabilité de HENIN voisin de ceux déterminés à Belle-Ile. La structure est meilleure pour les terres non cultivées et abandonnées à la lande à dactyle mais, le problème du maintien d'un bon niveau humique peut se poser dans les parcelles qui ne recevraient pas suffisamment de fumier ou qui ne porteraient pas assez souvent la prairie temporaire.

C. — *Caractères chimiques des sols*

Si les humus des landes d'éricacées ou d'ajoncs ont des pH voisins de 4,5 les terres de culture abandonnées ne sont pas très acides puisque le pH le plus bas observé est égal à 5,65. Étant donné les risques de destruction trop rapide de la matière organique, il n'est pas souhaitable d'élever les pH au-delà de 6,5 aussi, les besoins en chaux de ces dernières terres ne dépasseront pas 1 tonne à 1,5 tonne CaO /ha.

Les sols cultivés ont, en général, des pH supérieurs à 6 et parfois supérieurs à 7, lorsqu'ils ont reçu des quantités suffisantes d'amendements calcaires. La seule plage de l'île où nous ayons trouvé un sable contenant un pourcentage appréciable de calcaire est une petite plage située près de la pointe des Chats. Le sable constitué de coquilles grossières et de petits galets, contient 39,5 p. 100 de CaO. Par ailleurs, le sable de la plage de Locmaria contient 10 p. 100 de CaO,

	% de CaO
Le sable de la plage de Locmaria contient	10
Le sable de la plage des Grands-Sables	6,8
Le sable de la plage de Port Mélite	5,25
Le sable d'une petite carrière de sable de dune, près de la plage de Port Mélite	3

L'acide phosphorique assimilable est toujours très faible sauf dans le cas de 4 terres cultivées sur 11 analysées.

La potasse échangeable est faible à moyenne dans les sols abandonnés, elle dépasse 200 mg /kg dans quelques sols cultivés.

Le manganèse actif est abondant et les dosages révèlent des teneurs supérieures à 100 mg /kg, même pour des pH supérieurs à 6.

Le cuivre total, dosé pour 10 échantillons, est neuf fois supérieur à 20 p.p.m., ce qui exclut l'éventualité de carences cupriques. Les roches métamorphiques sont souvent bien pourvues en oligo-éléments, c'est le cas des micaschistes de Groix.

TABLEAU 4

Terres de l'île de Groix

Analyses chimiques

N°	Origine des échantillons	pH	Matières organiques ‰	P_2O_5 citrique mg/Kg	K_2O échangeable mg/Kg	Mn actif mg/Kg	Cu total mg/Kg
1	Glavezic, lande d'ajoncs	4,35	194	64	213		20
2	Kervedan, non cultivée	4,5	70	14	129		22
3	Port-Melin, lande de bruyères et ajoncs	4,6	136	58	167		20,5
4	Pradino, non cultivé, fétuque, agrostis	5,65	82,5	76	176		21
5	Kerlivio, non cultivé, dactyle	5,8	51,5	68	179		20
6	Pointe des-Chats, terre abandonnée	5,85	52,5	66	125		12,5
7	Port-Mélite, terre abandonnée, dactyle	6,1	46,5	54	145	187	38
8	Locmaria, terre abandonnée	7,25	77	86	227	106	23
	Parcelles cultivées :						
9	M. COUDRAY, Toul pris	5,9	45	20	192	209	
10	M. ROMIEUX, près du bourg	6,8	51	96	313	148	
11	M. LE CORRE, Locmaria	7,7	33,5	322	235		
12	M. ARIVEL, Kermarec	7,6	55	196	233		
13	M. ARIVEL, Lomener	7,5	48	82	267		
14	M. POSSEME, Kerbus	5,0	88	41	215		26
15	M. POSSEME, Kerlo	6,1	38,5	27	161	167	
16	M. POSSEME, Kerlo, ray-grass	6,1	47,8	178	273	167	35
17	M. POSSEME, Kerlivio	5,95	41	50	240	122	
18	M. POSSEME, entre Kerlo et Kerlivio	5,65	39	15	103		
19	M. POSSEME, Apéritif	6,8	48	270	243	155	

D. — *Conséquences agronomiques*

Les sols de l'île de Groix ont une granulométrie de type « granitoïde », ils sont peu profonds et faiblement pourvus en humus. Le problème de leur chaulage n'est pas préoccupant et se pose rarement mais il faut penser à les maintenir à un bon état humique donc, ne pas chercher à élever leur pH au-dessus de 6,5. Le point capital de leur fertilisation sera de nouveau ici, l'enrichissement phosphaté. L'orientation des spéculations doit s'inspirer de l'orientation évoquée à propos de Belle-Ile aussi bien pour des raisons économiques que pour des raisons purement techniques d'utilisation rationnelle des terres : les productions de viande et de lait entraîneront l'établissement de prairies temporaires et de fourrages annuels. Nous avons signalé la présence spontanée du dactyle dans les nombreuses parcelles abandonnées mais les ray-grass semblent réussir parfaitement dans les terres cultivées.

Reçu pour publication en février 1962.

SUMMARY

THE SOILS OF THE LORIENT, HENNEBONT, BELLE-ILE-EN-MER AND GROIX REGIONS.

Soils of about a dozen communities on the Atlantic coast and up to 30 km inland were investigated. The substrata are formed from granites, granulites and metamorphic rocks (micaceous schists, granulitic schists). The mechanical nature of the various formations studied always resembled the « granitoide type » containing 10 p. 100 clay, 17-18 p. 100 silt and 25-30 p. 100 coarse sand. Graph G shows a few cumulative curves typical of these soils. The depth of the solum in these soils is often unsatisfactory, but high levels of organic matter result in very good moisture-retention capacities and in a high cation-exchange capacity ; their structural stability in also good.

Pedological processes of leaching and podzolization do not restrict fields ; on the contrary, large areas are subject to hydromophic processes leading to gleys and peats.

The natural humus is of the Mor or Moder type, and while a weak podzolization occurs under heather and conifers, the cultivated soils show profiles of acid brown earths.

Two problems are important from the chemical point of view : liming and phosphate fertilizing. Liming ought to be done on a moderate scale, due to the hazards of manganese deficiency. Finally, severe deficiency of copper may occur in the granitic zone.

A survey of two small islands near to the continent, with rather higher annual mean temperatures, showed the natural humus to possess less extreme characteristics, having lower acidities and C/N ratios. The cultivated soils are less well provided with organic mather, and while trace-element deficiencies are unlikely to occur, phosphate fertilizers should be applied in ample quantities.

ZUSAMMENFASSUNG

DIE BÖDEN DER GEGEND VON LORIENT, HENNEBONT, BELLE-ILE-EN-MER UND GROIX

Vorliegende Studie ersteckt sich über ein Dutzend Gemeinden der atlantischen Küste bis zu 30 km ins Innere. Das Sustratum besteht aus Graniten, Granuliten une metamorphischen Gesteinen. (Schieferglimmer, schiefrige Granulite).

Die Korngrössenverteilung der verschiedenen untersuchten Gebilde ist ugf vom Typus « granitartig » : Ton-10 p. 100, Lehm 17-19 p. 100, Groboand 25-30 p. 100. Auf Fig. Gersieht man einige für diese Böden typische kumulative Kurven. Die lockere Tiefe dieser Gegend fehlt oft gänzlich, aber die grosse Menge organischer Substanz erlaubt ein sehr gutes Surückhalten des Wassers une eine gute Kationenaustauschfähigkeit. Ihre strukturelle Stabilität ist ebenfall zufriedenstellend.

Die pedologischen Erscheinungen wie Aus waschung und Podsolierung begrenzen keineswegs

die Erträge. Hingegen sind ziemlich grosse Flächen der Hydromorphie unterworfen : Gleyböden, Torfmoore. Die natürlichen Humusarten sind vom Typus Moor oder Moder ; deshalb sind die Böden unter Heide oder Nadelgehölz nur schwach podsoliert, aber die unter Kultur stehenden Parsellen haben ein Profil der « sauren Braunerde ».

Chemisch gesehen sind zwei Probleme wichtig : Kalken und Phosphordüngung. Die Kalkung sei mässig infolge Manganmangelgefahr. In Granitsonen können schwere Kupfermängel hervortreten.

Es wurden zwei kleine Inseln, nich weit vom Festlande entfernt, unter Beobachtung genommen. Die Niederschläge sind dort geringer, die mittl. Jahrestemperatur höher ; die natürlichen Humusstoffe sind weniger extrem ausgeprägt : Säure und C/N-Verhältnis sind schwächer. Die bebauten Böden enthalten weniger org. Substanz, die Mangelerscheinungen an Spurenelementen sind nicht zu befürchten, hingegen müssen die Phosphordünger in grösseren Mengen verwendet werden.

Почвы районов Лориента, Геннебона, Бель-Иль и Груа.

КОППЕНЭ и СОТР.

Исследование представляющее предмет данного труда было проведено в двенадцати волостях эшелонированных на 30 километров вглубь страны начиная от атлантического побережья.

Граниты, гранюлиты и метаморфические породы (слюдяные сланцы, сланцевые гранюлиты) составляют субстрат. Гранулометрия различных формаций подвергавшихся исследованию близка повсюду к одной и тойже форме называемой « гранитоидным типом» : глина — 10 %, суглинок — 17-18 %, крупнозернистый песок — 25-30 %.

На графике G представлены несколько типичных средних кривых этих почв. Глубина обработанного слоя часто недостаточна, но изобилие органического вещества придает ей хорошую водоемкость и повышенную емкость обмена катионами. Прочность структуры этих почв также велика.

Педологические феномены вымывания и оподзоливания не ограничивают их доходности. Напротив, довольно обширные площади подвержены гидроморфии : глейные почвы, торфянники. Природный гумус этих почв принадлежит к категории « Мор» или « Модер»; поэтому, если почвы эти слабо подвержены оподзоливанию под вересковыми и под хвойными, то в делянках под культурами они дают профиль « кислых каштановых почв».

С точки зрения химической — две проблемы привлекают внимание : известкование и внесение фосфорных удобрений. Известкование должно производиться в умеренных размерах в виду риска марганцевого недостатка. Также и сильный недостаток меди может проявиться в гранитических зонах.

Подвергнулись также исследованию два маленьких острова расположенных неподалеку от континента. Дождливость там меньше, средняя годовая температура — выше, а природный гумус характеризуется меньшими крайностями : кислотность и соотношение C/N менее велики. Окультуренные почвы менее богаты органическим веществом, риск недостатка в микро-элементах менее велик, но фосфорные удобрения должны применяться в больших количествах.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

COPPENET M., CALVEZ J., 1956. Sur l'origine des carences en cuivre. 6e *Congr. intern. Sci. Sol*, **2**, 493-497.

COPPENET M., HELIAS M., 1958. Les sols de la région de Gourin (Morbihan). *Ann. agron.*, **2**, 217-255.

COPPENET M., 1959. Le manganèse dans les sols de Bretagne et ses relations avec la croissance des végétaux. *Ann. agron.*, **2**, 155-218.

DUVAL L., 1959. Application de la méthode densimétrique aux sols de Bretagne. *Trav. Sta., Agron. INRA*, 1R 4R.

FEODOROFF A., 1960. Évaluation de la stabilité structurale d'un sol (Indice S). Nouvelles normes d'emploi pour appareil à tamiser. *Ann. agron.*, **6**, 651-659.

GUITIAN-OJEA F., MUÑOZ-TABOADELA M., 1957. El éncalado de los suelos de zona humeda. *Anal. Edafol. Fisiol veg.*, **16**, 11, 1017-1097.

HENIN S., MONNIER G., COMBEAU A., 1958. Méthode pour l'étude de la stabilité structurale des sols. *Ann. agron.*, **1**, 73-92.

KUBIENA W. L., 1953. The soils of Europe illustrated diagnosis and systematics. Consejo sup. de investigaciones cientificas of Madrid, Serrano 113, Madrid.

KUNTZ J., 1960. A Belle-Ile-en-Mer. *L'agriculteur du Morbihan*, nº 14.

KAPPEN H., 1929. Die Bodenazidität. Berlin (cité par GUITIAN-OJEA).

MERIAUX S., 1954. *a*. Contribution à l'étude de l'analyse granulométrique. *Ann. agron.* **1**, 5-59, 149-205.

MERIAUX S., 1954 *b*. Étude de quelques sols caractéristiques de la région de Dijon. *Ann. agron.*, **6**, 985-993.

ROBELIN M., COPPENET M., HELIAS M., 1957. Étude et cartographie des sols d'une commune des Côtes du-Nord : Loguivy-Plougras. *Ann. agron.*, **3**, 433-465.

Ann. agron., 1962, **13** (1)89.

CHRONIQUE DES LIVRES

631. 433. 1

KMOCH H. G. — DIE LUFTDURCHLÄSSIGKEIT DES BODENS. IHRE BESTIMMUNGS UND IHRE BEDEUTUNG FÜR EINIGE ACKERBAULICHE PROBLEME. (La perméabilité du sol à l'air. Sa détermination et sa signification pour quelques problèmes agronomiques.) Berlin, Borntraeger, 1962, 90 p.

Ce livre comporte cinq chapitres et une conclusion. Le premier chapitre montre le développement historique des conceptions et des méthodes relatives à la perméabilité à l'air, à la teneur en air du sol et aux facteurs qui l'influencent, et à la mobilité de l'air du sol.

Le deuxième chapitre traite de la théorie et de la méthodologie de la mesure de la perméabilité à l'air du sol. Les fondements théoriques de cette mesure se basent sur la loi de DARCY et l'appareil de mesure de ZUNKER est basé sur ce principe. Cependant ces conceptions théoriques ont été modifiées, notamment par MUSKAT et TANNER qui ont construit un perméamètre décrit ici. On étudie ensuite la relation entre la porosité et la perméabilité du sol et la détermination de la répartition de la porosité dans le sol.

Le troisième chapitre porte sur l'appréciation de la perméabilité à l'air en tant que critère de la structure du sol. Les études sur le terrain ont porté sur des sols cultivés différents : sol à pseudogley et sol brun à pseudogley. On a étudié également différents degrés de tassement du sol, ainsi que l'influence de différentes méthodes de mise en valeur. Par ailleurs on compare les résultats obtenus au laboratoire sur échantillons non remaniés avec ceux obtenus au champ.

Le quatrième chapitre porte sur l'importance et sur la cause des erreurs commises dans les mesures de perméabilité à l'air.

Le cinquième chapitre traite de l'étude comparative de la porosité à l'air du profil du sol et de la répartition des racines. Quelques types de distribution radiculaire sont montrés en photographie.

Une très importante bibliographie termine cet ouvrage de 90 pages.

A. F.

634. 9

PLAISANCE G. — GUIDE DES FORÊTS DE FRANCE. Paris, La Nef de Paris Éditions, 1961, 416 p illustr.

Ce guide, dû à l'un de nos plus éminents spécialistes de la foresterie, constitue une encyclopédie miniature de la forêt française.

Dans une première partie, sont passés en revue les différents aspects de la forêt : flore, climat, sol, actions humaines et animales, histoire, géographie, utilisation, sans oublier le rôle qu'elle a joué ou joue dans le folklore, le tourisme et comme source d'inspiration dans la littérature et les arts.

La seconde partie de l'ouvrage est un répertoire des différents massifs forestiers de France, disposés dans l'ordre alphabétique des noms : au total 1 353 petites monographies, accompagnées chacune d'une bibliographie, de l'indication des superficies, des particularités et curiosités.

Le guide est complété par une abondante bibliographie de références communes aux deux parties, un petit lexique forestier et un index des matières. Il est illustré de 14 planches hors texte, 3 dépliants 66 figures et cartes dans le texte.

D. K.

ANNALES

AGRONOMIQUES

Vol. 13 - 1962 - n°2.

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

Reproduction, même partielle, interdite sans autorisation des auteurs et de l'Institut national de la Recherche agronomique.

Ann. agron., 1962, **13** (2), 93-110.

631. 811. 3 : 631. 811. 91

QUELQUES ASPECTS DES INTERACTIONS ENTRE L'ALIMENTATION POTASSIQUE ET L'ALIMENTATION HYDRIQUE DES PLANTES

R. BLANCHET, R. STUDER et Colette CHAUMONT
Station agronomique, Châteauroux (Indre).

SOMMAIRE

Les interactions potassium-eau sont étudiées sur trois espèces végétales cultivées dans trois sols semi-artificiels de composition exactement connue, diversement enrichis en potassium, et maintenus à divers niveaux d'humidité. L'effet de l'alimentation potassique sur la transpiration et l'utilisation des réserves hydriques du sol est examiné et discuté. Il en est de même de l'influence combinée des deux facteurs sur la croissance, la production de matière végétale, la résistance à la sécheresse et les consommations de luxe.

INTRODUCTION

Ainsi que l'ont déjà souligné plusieurs auteurs (HUDSON, 1958 ; ACHITOV, 1961), les rapports entre l'alimentation potassique et l'alimentation hydrique des plantes sont très complexes et mal connus. BLACK (1957) distingue quatre aspects différents dans ces rapports :

— influence spécifique du potassium sur le métabolisme de l'eau, en particulier sur la transpiration,

— influence du potassium sur le volume d'eau nécessaire à la production d'une quantité donnée de matière sèche, problème assez vague, auquel la notion d'évapotranspiration potentielle a enlevé beaucoup d'intérêt, et que BLACK appelle « effet général de croissance »,

— effet de sel, augmentant la pression osmotique des solutions de certains sols alcalins très riches en potassium,

— interactions entre les alimentations potassique et hydrique dans la production de matière sèche, point qui a été peu étudié jusqu'ici.

Selon ACHITOV (1961), une certaine confusion règne dans la littérature sur l'ensemble de ces sujets, les conditions expérimentales n'étant souvent pas très bien définies, ce qui conduit à des résultats parfois contradictoires. Des indications se dégagent cependant en faveur d'une action spécifique du potassium sur la réduction de la transpiration, et, de façon moins certaine, sur l'utilisation plus poussée des réserves hydriques du sol. Ces deux effets peuvent être dus au rôle particulièrement actif que joue le potassium dans la pression osmotique des végétaux, dont nous avons donné précédemment un exemple (BLANCHET, 1958).

Nous exposons ici un ensemble de résultats obtenus en vases de végétation dans des conditions aussi bien définies que possible. Ils concernent l'influence de la teneur en potassium des végétaux sur leur transpiration, leur résistance à la sécheresse, et l'interaction proprement dite potassium-eau quant à la production de matière sèche de plusieurs plantes de prairie.

TECHNIQUES EXPÉRIMENTALES

Les cultures ont été effectuées dans des vases renfermant 10 kg de sols semi-artificiels obtenus par des mélanges en proportions diverses de quartz broyé et d'un sous-sol très argileux prélevé dans un dépôt cénomanien. Cette argile présente très peu de phénomènes de rétrogradation et de régénération d'ions K^+. La composition granulométrique des mélanges réalisés est indiquée dans le tableau 1.

TABLEAU I

Principaux caractères des sols semi-artificiels utilisés

Caractères	Sols		
	I	II	III
% de terre : Argile	6,5	13	26
Limon	0,4	0,8	1,6
Sable très fin	0,8	0,8	1,3
Sable fin	2,9	2	3,5
Sable grossier	26	24	18,5
Éléments > 2 mm	61,7	59	47,1
En méq par kg : CEC	50	100	200
K échangeable	0,625 à 5	1,25 à 10	2,5 à 20
Teneurs en eau, % de terre sèche :			
— après ressuyage, en allonges	18,1	23,4	33
— à l'apparition de flétrissements temporaires	5,5	7	11,5
— Humidités réalisées : optimum	13,3	17	25
80 %	10,6	13,6	20
60 %	7,95	10,2	15

Les mélanges I, II et III, dont les capacités d'échange de cations T étaient respectivement de 50, 100 et 200 méq par kg, ont été subdivisés en quatre lots, et enrichis en potassium de telle sorte que les rapports $100 \frac{K \text{ échangeable}}{T}$ soient de : 1,25 ; 2,5 ; 5 ; 10 (soit des teneurs en K_2O échangeable variant de 0,03 à 0,94 p. 1000 de sol). Ces milieux ont été pourvus de quantités convenables de tous les éléments : N, P, S, B, Mo, Cu, Mn, Zn ; les teneurs en Ca, Mg et Fe étaient largement suffisantes.

Trois cultures différentes ont été réalisées sur ces divers milieux : ray-grass d'Italie, trèfle violet var. *Sepia* et luzerne Orchésienne. Les caractères essentiels de l'alimentation potassique de ces trois plantes, dans les mêmes conditions, ont été exposés par ailleurs (BLANCHET et al, 1962). Les végétaux étaient cultivés dans un abri grillagé à toit vitré, largement aéré.

Quatre coupes successives ont été effectuées sur ces cultures, à l'époque de la floraison. Jusqu'à la première coupe, les milieux ont été entretenus à une humidité sensiblement optimum, afin d'obtenir une bonne implantation des végétaux et en particulier un bon développement des systèmes radiculaires. En raison de l'abondance des organes aériens, entraînant une transpiration active, il n'a pas été possible de maintenir constamment les milieux à un pF donné. L'humidité a plutôt été entretenue, par des arrosages effectués une ou deux fois par jour selon les conditions climatiques, entre deux limites répondant aux conditions suivantes :

— croissance très active, d'après l'essai de plusieurs taux d'humidité;

— absence de tout flétrissement même temporaire, et réserve appréciable par rapport à la teneur en eau correspondant aux débuts de flétrissement;

— absence d'eau s'égouttant librement et aération suffisante des milieux;

— réalisation, à chaque arrosage, d'une humidité représentant 75 p. 100 de l'eau retenue par les sols, en allonges, après complet ressuyage;

Pour faciliter la répartition homogène de l'eau dans le sol, celle-ci était introduite dans chaque pot au moyen de trois tubes d'arrosage disposés en triangle, et percés latéralement de six trous chacun.

Après la première coupe, les plantes ont été subdivisées en trois lots soumis à trois régimes d'humidité différents (tableau 1) :

— humidité optimum définie ci-dessus : très bonne alimentation en eau;

— teneur en eau représentant 80 p. 100 de cet optimum : alimentation moyenne;

— teneur en eau représentant 60 p. 100 de l'optimum : alimentation réduite.

L'apparition des flétrissements temporaires correspondait, selon les milieux, à 35 à 50 p. 100 de la teneur en eau des sols maintenus à l'humidité optimum. Le troisième traitement représentait donc des conditions de sécheresse assez sévères. Le graphique 1, qui indique en fonction de la teneur en K des milieux les quantités de matière sèche obtenues sur la luzerne au cours de la deuxième coupe, illustre ces faits. Dans les sols les plus pauvres en potassium, celui-ci est le facteur limitant essentiel ; au fur et à mesure de l'amélioration du niveau potassique, l'alimentation en eau limite sévèrement la croissance, d'abord dans les traitements humidité 60 p. 100, puis dans les traitements humidité 80 p. 100. Les conditions expérimentales faisaient donc bien apparaître les deux facteurs limitants potassium et eau ; les interactions de ces deux facteurs peuvent ainsi être étudiées. Les transpirations étaient mesurées par les pertes de poids subies par les pots entre deux arrosages.

L'expérience a montré que les humidités respectivement reconnues, d'après l'observation des végétaux, comme bonne, moyenne ou réduite, ne correspondaient pas dans les différents milieux aux mêmes pF. Ceux-ci étaient d'autant plus faibles que les sols étaient plus sableux. Dans ces conditions d'absorption rapide des réserves hydriques du sol, l'alimentation en eau des plantes a été beaucoup plus gouvernée par les facteurs cinétiques mis en évidence par HALLAIRE (1960) que par l'énergie de rétention de l'eau, exprimée par le pF. Nous comptons revenir ultérieurement sur ces phénomènes, et nous bornerons ici à exposer les résultats relatifs aux interactions potassium eau proprement dites, sans chercher à rattacher les alimentations hydriques observées à l'une ou l'autre des théories signalées ci-dessus.

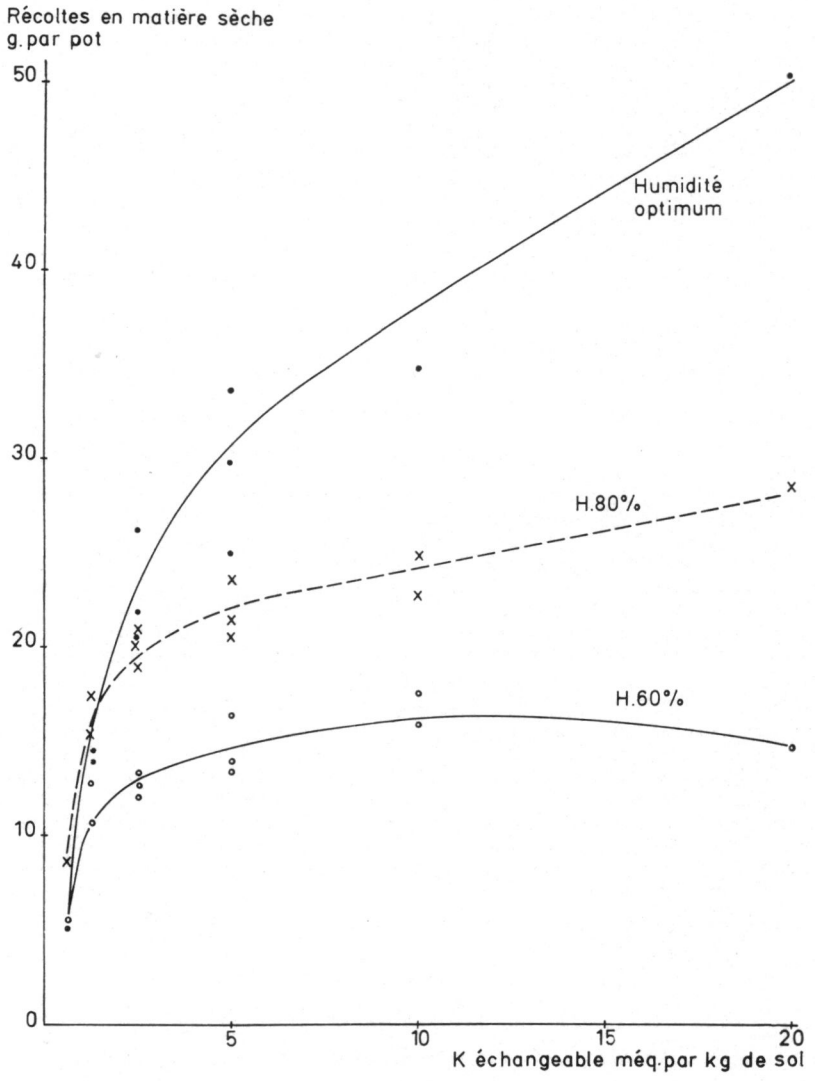
RÉSULTATS

I. — *Alimentation potassique des plantes et teneur en eau du sol*

Comme le souligne WALLACE (1958), deux aspects doivent être envisagés dans cette question : l'influence de l'humidité du sol sur la teneur en potassium des plantes d'une part, et sur la quantité totale de K absorbé d'autre part. Le graphique 2 représente, en fonction des taux de K échangeable des sols, la teneur de la luzerne en cet élément aux trois humidités différentes. Si les apports de potassium au sol ont eu un effet considérable sur la richesse en K des tissus végétaux, les modifications d'humidité n'ont par contre exercé qu'une influence assez faible. Les plantes

cultivées en milieux secs sont un peu plus riches ; cela s'explique facilement par leur croissance beaucoup plus faible (graphique 1).

Les quantités totales de potassium absorbé varient cependant beaucoup selon

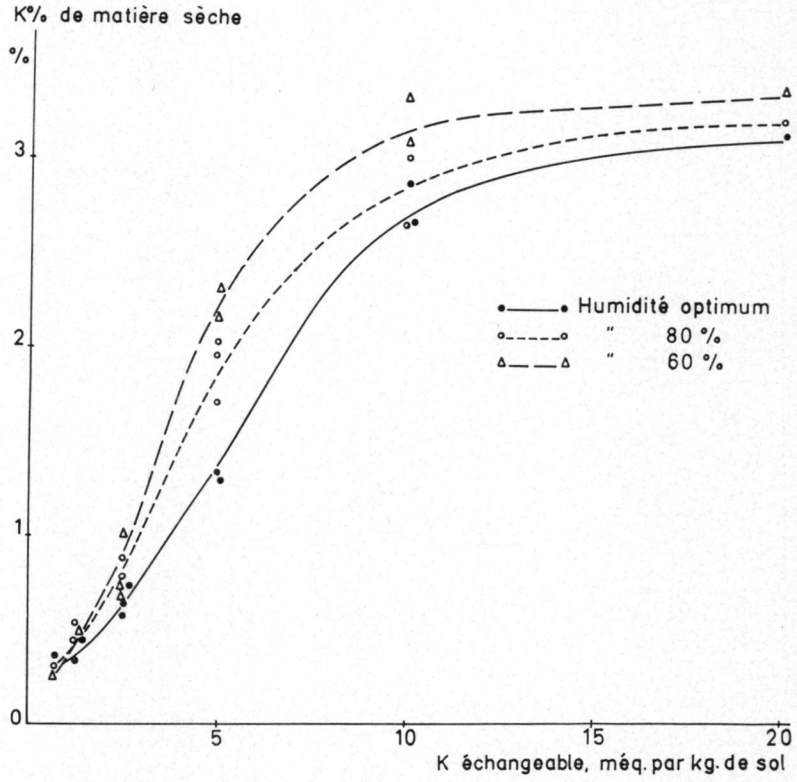


GRAPHIQUE 1. — *Récoltes de Luzernes en matière sèche, aux trois humidités des sols, en fonction des apports de potassium* (2e *coupe*).

l'alimentation hydrique. La représentation est de la même forme que celle du graphique 1 : la quantité de potassium absorbée dans les milieux renfermant les mêmes réserves potassiques varie essentiellement en fonction du poids de matière sèche produite.

Les exportations croissent donc avec l'humidité du sol. Il en est de même pour les trois espèces végétales expérimentées.

Ainsi, la modification de l'alimentation hydrique à peu altéré la teneur des plantes en potassium, c'est-à-dire une sorte d'équilibre qui s'établit entre le végétal et le sol quant à leurs teneurs respectives en K. La sécheresse a légèrement augmenté ces teneurs, mais elle a fortement réduit les exportations totales des plantes, en raison de leur croissance beaucoup plus faible.



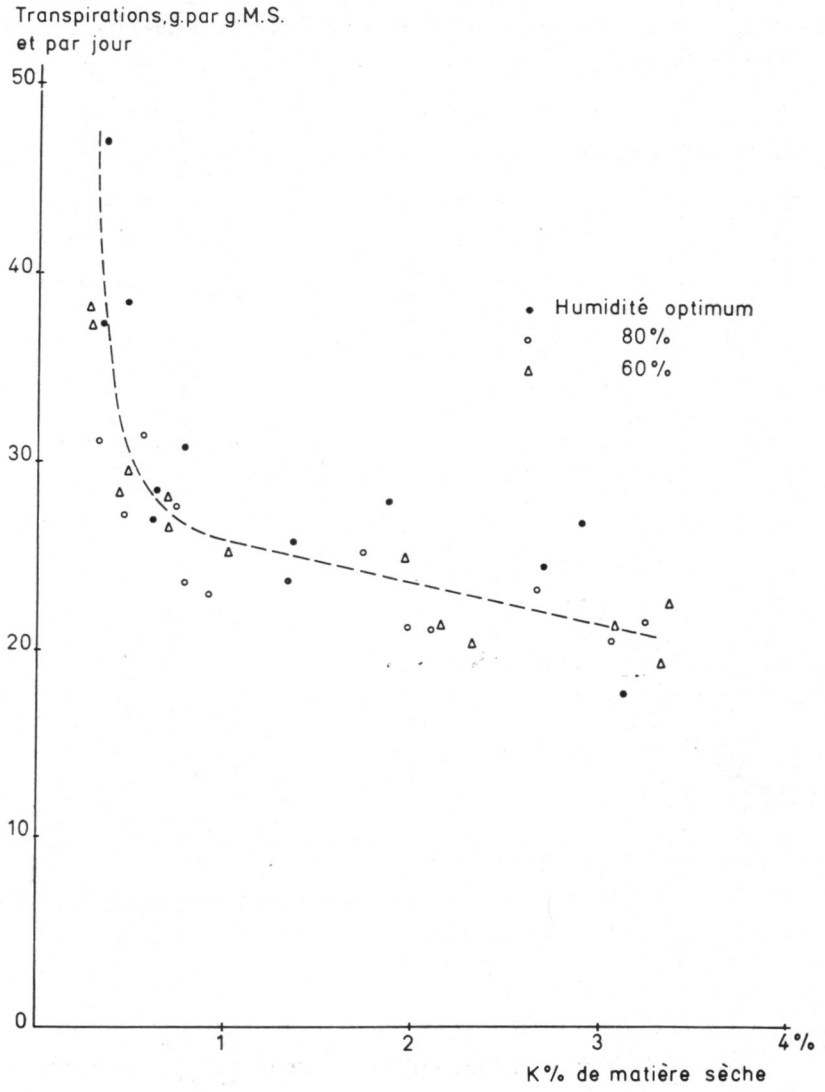
GRAPHIQUE 2. — *Teneurs en potassium de la Luzerne, aux trois humidités différentes, en fonction des taux de potassium échangeable des sols.*

II. — *Transpirations et teneurs en potassium des plantes*

1° *Luzerne.*

Sur le graphique 3, les quantités moyennes d'eau transpirées par gramme de matière sèche au cours des dix jours ayant précédé la deuxième coupe de la luzerne sont représentées en fonction des teneurs des plantes en potassium. Les valeurs portées en ordonnées ont une signification voisine du « coefficient de transpiration », c'est-à-dire de la quantité d'eau nécessaire à la production d'une unité de poids de matière sèche. Deux conclusions essentielles apparaissent :

a) Ce coefficient diminue considérablement au fur et à mesure de l'amélioration de l'alimentation potassique. Cependant, le phénomène est complexe, car il englobe



GRAPHIQUE 3. — *Quantités d'eau transpirées par gramme de matière sèche en fonction de la teneur en potassium de la Luzerne.*

« l'effet général de croissance » signalé par BLACK (1957) ; ce point sera discuté ci-dessous (tableau 2, graphique 7).

TABLEAU 2

Influence de l'alimentation potassique sur la transpiration et l'utilisation des réserves hydriques des sols, au cours de deux périodes climatiques différentes (Luzerne)

N°	Humidité du sol 1	Méq K par kg de sol 2	Matière produite g/pot 3	K % de M. S. 4	Transpiration, g par g M. S.		Transpiration totale par pot, g par jour	
					21-25-8-61 5	26-30-8-61 6	21-25-8 7	26-30-8-61 8
1	Optimum	2,5	9	0,72	—	92,8	—	835
2	—	5	18,9	1,02	28,5	56,3	538	1 064
3	—	10	27,75	2,4	27,5	44,5	765	1 236
4	—	20	28,3	3,6	25,8	45,3	730	1 282
5	80 %	2,5	10,75	0,72	41	71,7	441	772
6	—	5	14,45	0,99	34	56,5	494	816
7	—	10	20,1	2,7	27,7	44,6	557	898
8	—	20	22,35	3,63	26,7	41,4	597	925
9	60 %	2,5	8,45	0,84	37	63,7	313	538
10	—	5	10,6	1,38	32,7	55,6	347	591
11	—	10	13	3,15	29,2	49,6	380	646
12	—	20	13,8	3,96	24,4	42	336	579

b) Les points correspondant aux différentes humidités des sols sont fondus entre eux. L'intensité de la transpiration, ramenée à l'unité de poids sec de matière végétale, a été au moins autant réglée par la teneur des plantes en potassium que par le degré d'humidité du sol.

Le tableau 2 permet d'examiner plus en détail ces divers faits. Il indique les transpirations des Luzernes cultivées sur les sols les plus argileux (mélange 3), diversement enrichis en potassium, et maintenus aux trois humidités différentes. Ces transpirations ont été observées peu avant la troisième coupe, d'une part pendant cinq jours où elles ont été relativement peu intenses (21 au 25 août), d'autre part pendant cinq jours très chauds (26 au 30 août 1961). Les moyennes des caractères climatiques relevées pendant ces deux périodes sous l'abri où se trouvaient les plantes sont :

	21-25 août	26-30 août
Températures minima	15,0°C	16,5°C
Températures maxima	27,2	35,0
Évaporation (évaporomètre de Piche)	3,2 mm/jour	5,3 mm/jour

a) Les transpirations totales (colonnes 7 et 8) augmentent, pour une même humidité du sol, avec le développement des plantes, c'est-à-dire ici avec l'amélioration de l'alimentation potassique. La diminution de l'humidité du sol provoque une forte réduction à la fois de la transpiration et de la production de matière sèche.

b) Lorsque l'on rapporte la transpiration à la matière sèche produite (colonnes 5 et 6), les observations sont très différentes : le coefficient de transpiration diminue d'une part avec l'augmentation de la quantité de matière sèche produite, d'autre part avec l'augmentation de la teneur en potassium des plantes.

La diminution du coefficient de transpiration lorsque la quantité de matière

sèche produite augmente, s'explique aisément : c'est l'effet général de croissance tel que l'entend BLACK. La transpiration est étroitement liée aux facteurs climatologiques. et notamment à la quantité d'énergie reçue par unité de surface de sol recouverte d'organes végétaux (TURC, 1961 ; BOUCHET, 1961). La quantité d'énergie interceptée par les végétaux couvrant le sol ne varie pas considérablement selon leur état plus ou moins luxuriant, ce qui conduit à la notion d'évapotranspiration potentielle de cultures couvrant bien le sol. Dans la mesure où la transpiration est réglée par l'énergie reçue, il est évident que la transpiration par unité de poids de matière sèche est d'autant plus faible que le développement des plantes est plus abondant. Ce raisonnement ne doit pas être poussé trop loin, surtout dans le cas de cultures en pots, comme l'indiquent les colonnes 7 et 8 : la transpiration croît avec la luxuriance des plantes (qui ont d'ailleurs tendance à déborder la surface du pot). Le rôle de l'énergie reçue est néanmoins très important.

Un effet spécifique du potassium apparaît cependant dans un examen approfondi. Considérons par exemple les plantes n° 6, 11 et 12, qui ont fourni des récoltes comparables, et dont les teneurs en K p. 100 de matière sèche vont croissant. On observe, en fonction de l'amélioration de l'alimentation potassique, une très nette diminution du coefficient de transpiration (colonnes 5 et 6), qu'il s'agisse de journées chaudes ou peu ensoleillées. La comparaison des n°s 11 et 12 est particulièrement suggestive : la transpiration *totale* (colonnes 7 et 8) est plus faible dans le n° 12 que dans le n° 11, bien que la croissance ait été un peu supérieure dans le n° 12.

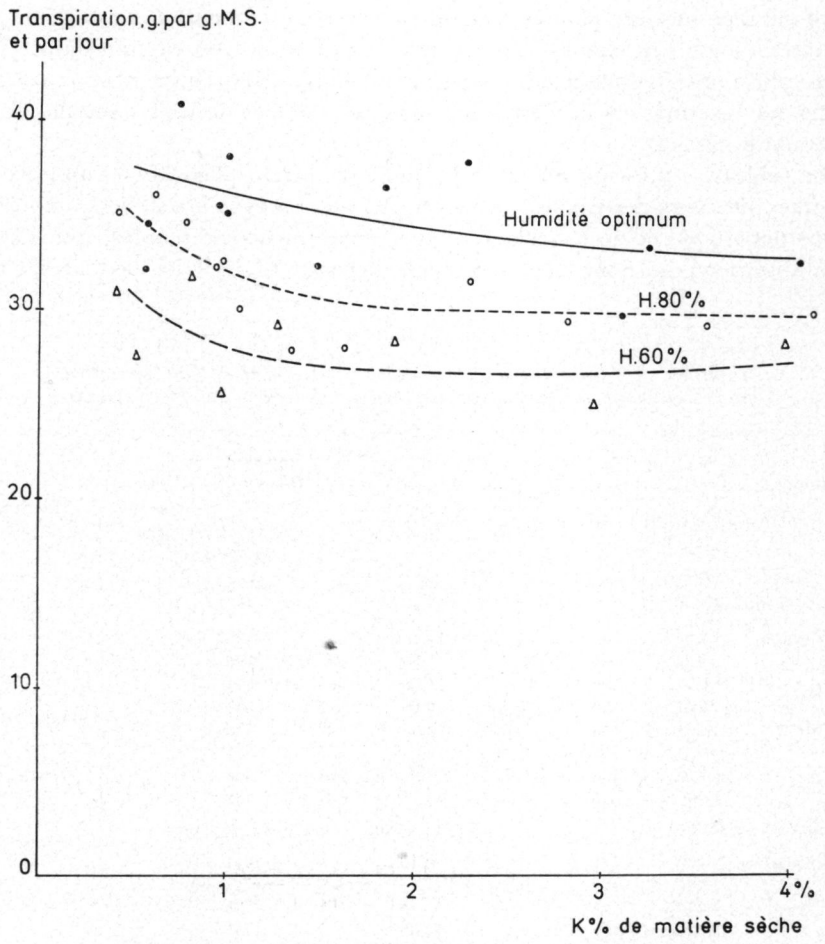
On peut également comparer les n°s 5 et 10, dont les rendements en matière sèche ont été sensiblement égaux. Une forte réduction du coefficient de transpiration est encore corrélative de l'enrichissement en potassium de la plante. Notons enfin que, chez le n° 1, il semble y avoir eu une consommation de luxe d'eau, favorisée par la déficience potassique : les rendements des n°s 1, 5 et 9 sont comparables, et la transpiration diminue lorsque le milieu devient plus sec. Le n° 1 a donc donné lieu à une véritable consommation de luxe d'eau : augmentation de la transpiration sans augmentation de la production de matière sèche.

En résumé, on peut estimer à 20 p. 100 au moins la diminution relative du coefficient de transpiration provoquée chez la Luzerne par l'amélioration de l'alimentation potassique (n° 6, 11 et 12 d'une part, 5 et 10 d'autre part), en dehors de tout effet général de croissance. Les conditions climatiques déterminent le niveau global de la transpiration ; le facteur physiologique que représente l'alimentation potassique intervient de façon très appréciable pour modifier ce niveau global, que l'évapotranspiration potentielle soit moyenne ou très forte.

2° *Ray-grass et Trèfle.*

Nous observons chez le Ray-grass d'Italie un comportement très différent de celui de la Luzerne, comme l'indique le graphique 4 qui représente les coefficients de transpiration en fonction des teneurs en potassium de la matière sèche. Grâce au développement abondant de son chevelu radiculaire, cette plante exploite beaucoup mieux les réserves potassiques des sols pauvres, et l'effet de la carence est moins marqué (BLANCHET et al, 1962). D'autre part, elle paraît mieux adaptée que la Luzerne à la résistance à la sécheresse, lorsqu'un même volume de sol est mis à la disposition des deux espèces.

Ces deux faits expliquent que les coefficients de transpiration dépendent peu de l'alimentation potassique, et soient au contraire notablement influencés par la teneur en eau du sol. Les trois courbes correspondant aux trois humidités différentes sont en effet nettement distinctes. L'effet du potassium dans l'économie de l'eau est donc ici assez faible.



GRAPHIQUE 4. — *Quantités d'eau transpirées par gramme de matière sèche en fonction de la teneur en potassium du Ray-grass.*

Le comportement du Trèfle a été intermédiaire entre ceux de la Luzerne et du Ray-grass : l'influence de l'alimentation potassique sur la transpiration est nette, mais moins importante que chez la Luzerne.

III. — *Utilisation des réserves hydriques du sol et alimentation potassique*

On peut supposer qu'une forte teneur en potassium des racines élève leur pression osmotique et leur force de succion, leur permettant ainsi une exploitation plus poussée des réserves hydriques des sols. Ce phénomène existe effectivement, comme

l'indique le tableau 2 (colonnes 7 et 8). L'eau était en effet un facteur nettement limitant dans les milieux maintenus à 60 p. 100 et 80 p. 100 de l'humidité optimum ; or, les transpirations totales, qui représentent le degré d'utilisation des réserves du sol, augmentent notablement avec les doses de K apportées. Le phénomène est aussi net pendant les journées chaudes que pendant les journées peu ensoleillées. Dans les sols renfermant 80 p. 100 de l'humidité optimum, l'amélioration de l'alimentation potassique a permis aux plantes d'augmenter leur consommation d'eau de 30 p. 100 pendant les jours peu chauds (441 à 597 g), et de 18 p. 100 environ dans les jours chauds (772 à 925 g). Comme dans le paragraphe précédent, l'alimentation potassique modifie les réactions de la plante aux données globales de la dynamique de l'eau, réglées par le climat.

Le tableau 3 présente un autre exemple du même phénomène, observé sur le Ray-grass, au cours des coupes successives. Il met en évidence l'effet combiné de la carence potassique et de la sécheresse sur l'épuisement des plantes, qui n'arrivent plus à absorber l'eau dont elles pourraient disposer. Il s'agit ici des milieux renfer-

TABLEAU 3

Influence de l'alimentation potassique et de la teneur en eau du milieu sur la croissance et l'utilisation des réserves hydriques du sol (Ray-grass)

N°	Humidité du sol	K éch., mg par pot	K absorbé mg par pot	K % de matière sèche	Mat. sèche produite g/pot	Transpiration journalière g par pot		Poids des racines g/pot	Observations
						23-27/7	28/7-1-8		
2e *récolte* (coupe le 3-8-61)									
1	Optimum	218	98	0,75	13,1	575	535		
2	—	425	139	1	13,85	587	528		
3	—	1 030	281	1,83	15.35	605	561		
4	—	2 740	520	3,24	16,05	615	535		
5	80 %	283	105	0,78	13,45	502	463		Bonne utilisation.
6	—	570	151	1,08	14	489	421		
7	—	1 270	238	1,62	14,2	461	398		
8	—	2 960	530	3,54	15	487	439		
3e *récolte* (coupe le 30-8-61)					Dates : 21-25-8 : 26-30-8				
1	Optimum	120	39	0,42	9,15	386	641		
2	—	287	57	0,51	11,2	437	728		
3	—	750	84	0,66	12,75	456	778		
4	—	2 220	278	2,22	12,55	467	747		
5	80 %	178	37	0,44	8,5	289	469		Utilisation défectueuse.
6	—	419	73	0,62	10,35	343	587		
7	—	1 032	98	0,84	11,6	384	644		
8	—	2 430	331	2,4	13,8	441	692		
4e *récolte* (coupe le 17-10-61)					Dates : 11-13-10 : 14-17-10				
1	Optimum	81	53	0,44	12,05	236	130	45,4	
2	—	230	88	0,68	12,95	248	140	52	
3	—	664	148	0,86	17,25	317	175	51	
4	—	1 942	416	2,32	17,75	345	180	60,9	Utilisation extrêmement faible.
5	80 %	140	30	0,52	5,75	108	50	28,9	
6	—	346	76	0,8	9,45	150	80	35	
7	—	935	126	0,8	15,8	258	148	42,9	
8	—	2 099	368	1,92	19,2	318	160	45,9	

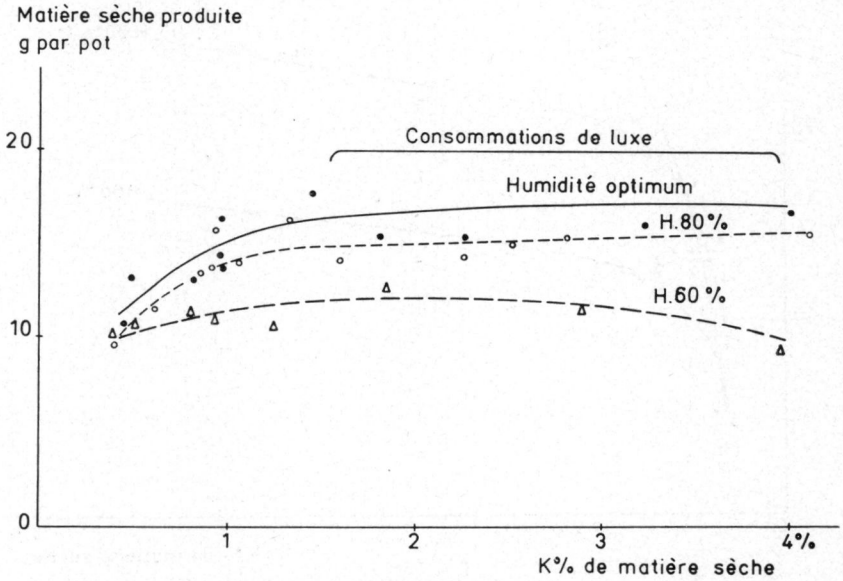
mant 13 p. 100 d'argile, et maintenus soit à l'humidité optimum, soit à 80 p. 100 de celle-ci. On peut admettre que les besoins en eau des cultures sont représentés, dans les périodes plus ou moins chaudes, par les transpirations observées dans les sols les plus humides.

Pendant la deuxième récolte, les transpirations ne varient guère en fonction des doses de potassium apportées ; elles sont naturellement plus faibles dans les milieux plus secs. A la troisième récolte, on observe une nette différenciation : les plantes carencées en K et placées en sols secs (nos 5 et 6) absorbent beaucoup moins d'eau que leurs homologues mieux alimentées en potassium (nos 7 et 8). Les récoltes obtenues dans les deux séries (nos 1 à 4 et 5 à 8) restent cependant du même ordre. Au cours de la quatrième récolte, enfin, on assiste à l'épuisement des cultures nos 5 et 6, qui n'absorbent qu'une faible part de l'eau utilisable, et dont la croissance est très faible. Les plantes mieux alimentées soit en potassium (nos 7 et 8), soit en eau (nos 1 à 4) continuent au contraire à croître normalement, et à utiliser les réserves hydriques du sol.

C'est donc le triple effet de la carence potassique, de la sécheresse et des coupes successives qui a amené l'épuisement des plantes nos 5 et 6. Cet épuisement est probablement dû, au moins partiellement, à une mauvaise reconstitution des réserves radiculaires, qui ne pouvaient assurer après la coupe une repousse normale. Le poids de leurs systèmes radiculaires s'avère en effet très réduit (tableau 3), et une partie des plantes est morte après la troisième coupe.

IV. — *Facteurs limitants et consommations de luxe de potassium*

Nous examinerons encore ce problème sur le Ray-grass et la Luzerne qui possèdent des comportements très différents ; le Trèfle présente des caractères intermédiaires entre les deux autres espèces.



GRAPHIQUE 5. — *Récoltes en matière sèche en fonction des teneurs en potassium du Ray-grass.*

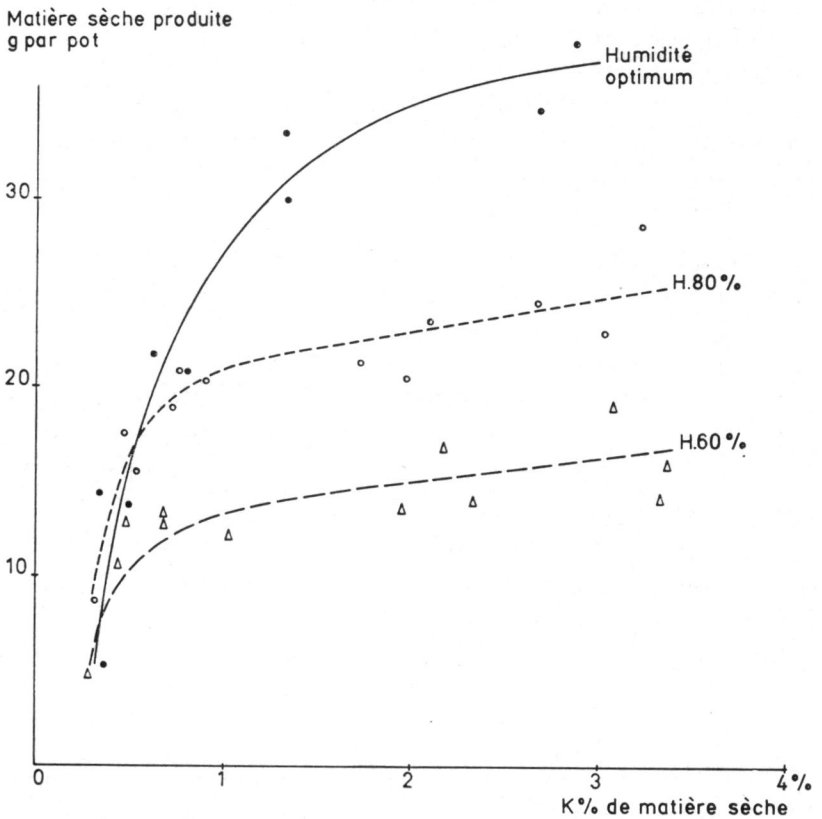
1° *Ray-grass.*

Nous avons vu que le Ray-grass est particulièrement apte à s'alimenter en potassium en milieu pauvre, et aussi à résister à la sécheresse. Ces deux faits expliquent les constatations que l'on peut faire sur le graphique 5, qui représente les quantités de matière sèche produites en fonction des teneurs en K de celle-ci.

Ce graphique fait apparaître, pour les trois humidités des sols, trois courbes sensiblement parallèles entre elles, et d'autre part parallèles à l'axe des abscisses sur la plus grande partie de la représentation. De fortes teneurs en potassium n'améliorent pas le développement de cette plante, et on peut considérer qu'il y a ici consommation de luxe dès que la matière sèche renferme plus de 1,5 p. 100 de K, quelle que soit l'humidité du sol. L'augmentation de celle-ci s'est traduite par une croissance plus active, et naturellement une absorption de potassium quantitativement plus importante. L'alimentation hydrique se révèle un facteur limitant même dans les sols très pauvres en K.

2° *Luzerne.*

Les deux facteurs limitants, potassium et eau, sont ici beaucoup plus imbriqués (graphique 6). L'alimentation potassique limite sévèrement la croissance



GRAPHIQUE 6. — *Récoltes en matière sèche en fonction des teneurs en potassium de la Luzerne*

dans les sols les plus pauvres. Au fur et à mesure de l'amélioration de cette alimentation, l'eau devient énergiquement limitante d'abord dans les milieux renfermant 60 p. 100 de l'humidité optimum, puis dans la série d'humidité moyenne. Cependant, la consommation potassique de luxe ne se manifeste pas de façon aussi précise que chez le Ray-grass : les courbes restent en effet légèrement ascendantes, indiquant que la forte teneur en potassium a permis aux plantes de mieux résister à la sécheresse, selon les mécanismes étudiés ci-dessus. La notion de consommation de luxe est ici assez ambiguë : l'augmentation de production de matière sèche est faible, mais non nulle.

Dans les sols les plus humides, enfin, cette expérience ne fait pas apparaître de consommation de luxe sur la Luzerne. Les conditions de la croissance étaient particulièrement favorables : la production de 35 g de matière sèche sur 10 kg de sol en un mois représenterait, pour 4 000 tonnes/ha de terre, dans le même délai d'un mois, une récolte de 15 tonnes de fourrage sec. Ces résultats sont sans doute rarement atteints dans les conditions naturelles, même en culture irriguée ; ils donnent cependant une indication des hauts niveaux de fertilisation qui doivent être pratiqués si l'on veut utiliser pleinement les possibilités fournies par l'irrigation ; rappelons en effet que les sols les plus riches renfermaient ici près de 1 p. 1000 de K_2O échangeable.

DISCUSSION

Nous examinerons de façon plus globale l'interaction potassium-eau à l'aide de la représentation figurée sur les graphiques 7, 8 et 9, où les coefficients de transpiration sont portés en fonction de la quantité de matière sèche produite, à diverses humidités et teneurs en potassium des sols. Les points sont reliés entre eux d'une part selon les teneurs en eau des sols, d'autre part selon les doses de K introduites. Cette représentation permet de faire la synthèse de l'ensemble des résultats exposés ci-dessus.

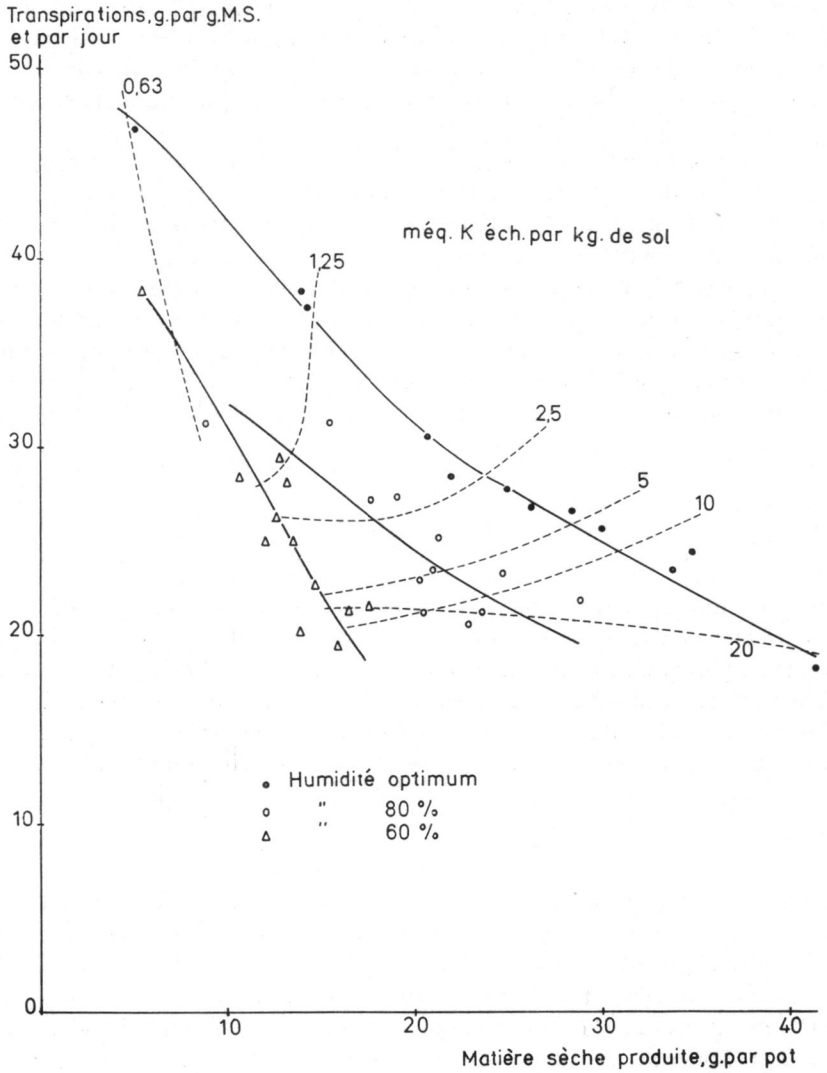
1° *Luzerne.*

Comme nous l'avons déjà constaté, l'interaction est la plus nette chez la luzerne (graphique 7). Le coefficient de transpiration diminue lorsque la quantité de matière sèche produite augmente ; c'est l'effet général de croissance tel que l'entend Black (1957). Il dépend également de l'humidité du sol : pour une même quantité de matière sèche formée, il est d'autant plus grand que le milieu est plus humide. Enfin, il dépend de l'alimentation potassique (voir aussi graphique 3) ; en effet, les lignes groupant entre eux les points correspondant aux mêmes doses de K apporté forment un faisceau dont les deux limites externes font apparaître les points suivants : (courbes relatives à 6,25 et à 200 méq K apportés):

— pour 6,25 méq K apportés : la quantité de matière sèche produite est sensiblement constante ; l'accroissement de l'humidité du sol ne provoque qu'une augmentation du coefficient de transpiration. Le potassium est le principal facteur limitant la croissance, et l'on observe en milieu humide une consommation de luxe d'eau.

— pour 200 méq K apportés : le coefficient de transpiration diminue légèrement,

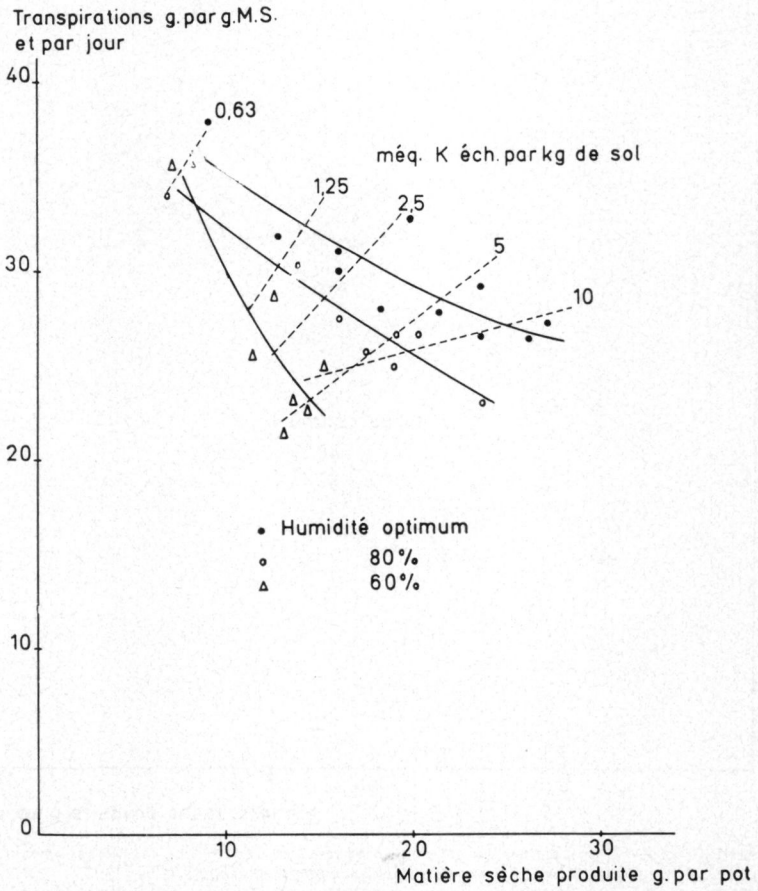
pendant que la production de matière sèche augmente, au fur et à mesure des disponibilités hydriques croissantes. L'eau reste le principal facteur limitant, et la bonne alimentation potassique permet de l'utiliser pleinement.



GRAPHIQUE 7. — *Transpiration par gramme de matière sèche, en fonction des récoltes obtenues, aux divers niveaux de potassium apporté et d'humidité. Luzerne* (2e *coupe*)

Entre ces deux limites, l'augmentation de l'humidité du sol se traduit par un rapport $\frac{\text{matière sèche produite}}{\text{coefficient de transpiration}}$ d'autant plus grand que l'alimentation potassique est mieux assurée. Croissance et transpiration dépendent à la fois de l'alimentation hydrique et de l'alimentation potassique, entre lesquelles s'exerce l'interaction.

Ce graphique permet en outre une constatation qui rejoint les observations précédentes : une même production de matière sèche, par exemple 15 g, peut être obtenue soit dans un milieu relativement sec et en présence de fortes doses de K (50 à 100 méq), soit dans un milieu humide et avec peu de potassium (12,5 méq). Naturellement, les fortes quantités de matière sèche ne peuvent toutefois être obtenues qu'avec une alimentation hydrique suffisante, l'interaction n'étant efficace qu'entre certaines limites.

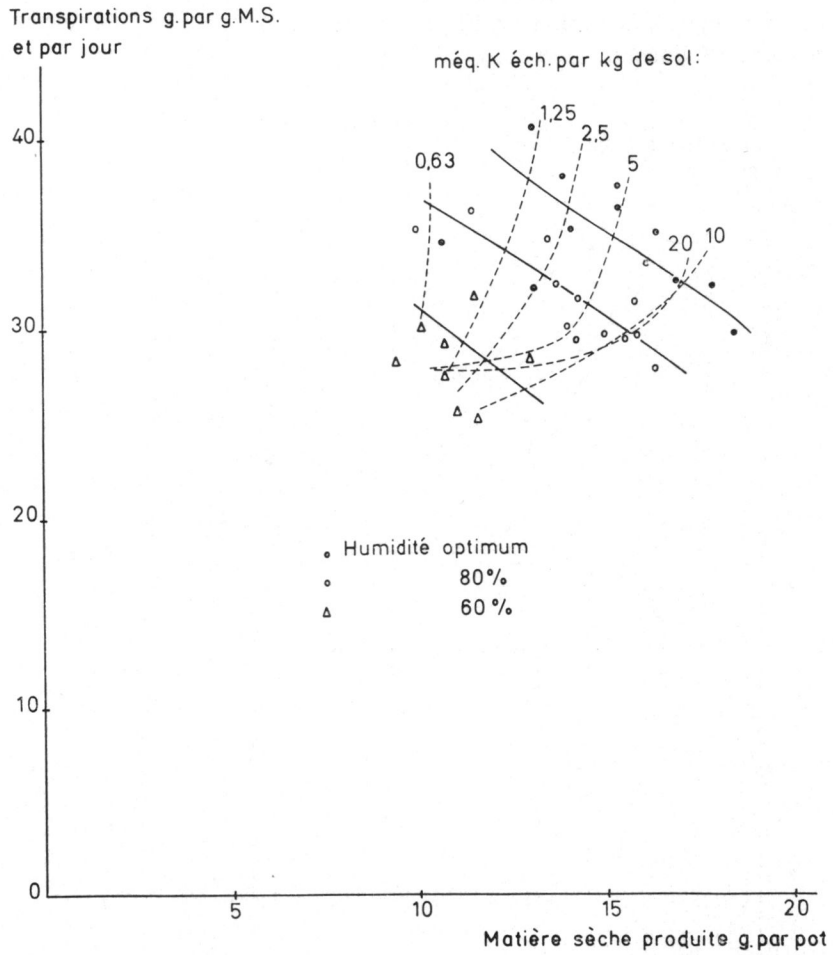


GRAPHIQUE 8. — *Transpiration par gramme de matière sèche, en fonction des récoltes obtenues, aux divers niveaux de potassium apporté et d'humidité. Trèfle* (2e *coupe*).

2° *Trèfle et Ray-grass.*

Nous retrouvons chez le Trèfle (graphique 8) les mêmes caractères essentiels que chez la Luzerne, mais ils sont beaucoup plus atténués. Les coefficients de transpiration sont en effet plus constants que dans le cas de la Luzerne. Il en est de même sur le Ray-grass, où nous avons vu que le coefficient de transpiration varie peu en fonction de l'alimentation potassique (graphiques 4 et 9). Pour ces deux plantes

comme pour la Luzerne, on constate néanmoins que dans certaines limites, une même production de matière sèche peut être obtenue soit en milieu humide avec faibles doses de potassium, soit en milieu sec avec des apports de K beaucoup plus importants.



GRAPHIQUE 9. — *Transpiration par gramme de matière sèche, en fonction des récoltes obtenues, aux divers niveaux de potassium apporté et d'humidité. Ray-grass (2e coupe).*

CONCLUSIONS

Ces essais mettent en évidence l'interaction potassium-eau, qui s'exerce avec une ampleur variable selon les espèces végétales ; très accusée chez la Luzerne, elle est moindre sur le Trèfle violet et faible sur le Ray-grass d'Italie. Cette interaction s'effectue par l'intermédiaire de deux mécanismes physiologiques essentiels, liés aux

phénomènes osmotiques : la diminution de la transpiration et l'utilisation plus poussée et plus rapide des réserves hydriques du sol, qui sont provoquées par une bonne alimentation potassique.

Si la dynamique de l'eau dans la plante est principalement réglée par les caractères climatiques, les facteurs physiologiques liés à la teneur en potassium des végétaux jouent néanmoins un rôle qui est loin d'être négligeable. Ce rôle s'exerce aussi bien dans les cas d'évapotranspiration intense qu'en présence de besoins hydriques plus modérés.

Cela permet à l'alimentation hydrique et à l'alimentation potassique de se compenser, dans certaines limites, pour assurer la croissance et la production de matière sèche. Lorsque l'une ou l'autre sont trop limitantes, les consommations de luxe apparaissent, aussi bien en eau qu'en potassium.

Dans un domaine se rapprochant des préoccupations pratiques, on peut souligner deux faits :

— en culture irriguée, il ne peut être pleinement tiré parti des apports d'eau que si les conditions d'alimentation minérale sont excellentes, et vraisemblablement très supérieures aux normes admises en culture « sèche ». Le rôle de l'alimentation potassique a été mis ici en évidence ; on peut penser qu'il en va de même pour les autres éléments fertilisants.

— à l'opposé, l'épuisement provoqué chez le Ray-grass par une carence combinée en potassium et en eau empêche la plante d'utiliser les faibles réserves hydriques dont elle pourrait disposer. Une bonne fertilisation potassique peut donc constituer un facteur appréciable de résistance des prairies aux sécheresses d'été, surtout lorsque celles-ci sont surpâturées faute de réserves fourragères suffisantes.

Reçu pour publication en mars 1962.

SUMMARY

SOME ASPECTS OF THE INTERACTIONS BETWEEN THE POTASSIUM AND WATER NUTRITION OF PLANTS

The interactions between the potassium and water nutrition were studied on Italian ryegrass, red clover and lucerne in large containers. Three different semi-artificial soils were used, enriched with known amounts of exchangeable potassium at increasing rates, and maintained at three different levels of moisture. The potassium and water nutritions were thus varied over a wide range.

Different moisture levels affected the potassium content of plants much less than the total amount of absorbed K, depending on the quantity of dry matter produced.

There was a clear-cut relationship between very high potassium concentrations in the plant and decrease in plant transpiration, distinct from the « general effect of growth » (BLACK, 1957) A good potassium nutrition also improved the utilization of soil moisture reserves, and increased drought resistance. Though the dynamics of water in the plant is mainly governed by climatic conditions, these physiological factors have appreciable effects.

The interaction is more marked in lucerne than in clover and ryegrass. Within certain limits, potassium and water nutrition may mutually compensate for each other in assuring growth and dry-matter production (graphs 7, 8 and 9).

ZUSAMMENFASSUNG

ZUR FRAGE WECHSELWIRKUNGEN ZWISCHEN KALI- UND WASSERAUFNAHME DER PFLANZEN

Die Wechselwirkungen zwischen Kali- und Wasseraufnahme wurden in grossen Vegetationsgefässen mit drei Pflanzenarten untersucht : welsches Weidelgas, Rotklee und Luzerne. Es wurden drei verschiene halbkünstliche Böden benützt, mit bestimmten und steigenden Gaben austauschbarem Kali angereichert und in drei verschiedenen Feutchtigkeitsstadien. Die Kali- und Wasseraufnahme betrug also eine grosse Auswahl kombinierter Variationen.

Die verschiedenen Feuchtigkeitsstadien haben den Gehalt der Pflanzen an Kali weniger beeinflusst als die Gesamtmenge an absorbiertem Kali ; und diese waren in Abhängigkeit von der gebildeten Trockenmasse.

Es zeigte sich ein sehr deutlicher Einfluss der starken K-Gehalte auf die Herabsetzung der Verdunstung, nicht zu verwechseln mit dem « allgemeinen Wachstumseffekt » (Black 1957) Eine gute K-Aufnahme hat auch eine bessere Verwertung der Wasserreserven der Böden zufolge, und verbessert den Widerstand gegen Trockenheit. Obwohl die Dynamik des Wassers in der Pflanze hauptsächlich klimatisch regliert wird, üben die physiologischen Faktoren einen ganz bedeutenden Einfluss aus.

Die Wechselwirkung ist für Luzerne deutlicher als für Rotklee oder Weidelgras. Die Aufnahme von Kali und Wasser kann sich gegenseitig in gewissen Grenzen ausgleichen, um Wachstum und Erzeugung der Trockenmasse zu bewerkstelligen (fig. 7, 8 und 9).

О некоторых видах взаимодействия между калиевым и водным питанием растений.

Р. БЛАНШЕ, Р. СТЮДЕР и Колетта ШОМОН (Шатору).

Взаимодействие между калиевым и водным питанием изучалось в больших вегетационных вазах на трех растениях : итальянский райграсс, красный клевер и синяя люцерна. Были испробованы три различных полу-искуственных почвы обогащенные определенными и увеличивающимися количествами обменного калия и содержавшиеся в трех различных состояниях влажности. Калиевое и водное питания растений представляли таким образом широкую гамму разнообразных комбинаций.

Изменения влажности менее подействовали на содержание калия в растениях чем на общую сумму этого элемента поглощенную ими, так-как эта последняя зависит от количества сформированной сухой массы.

Удалось ясно установить что транспирация растений сокращается в случаях когда они содержат крупные количества калия. Влияние это отличается от « общего эффеета произростания » (Блак, 1957). Рациональное калиевое питание вызвало также лучшее использование растениями запасов почвенной влаги и увеличило их устойчивость к засухе. Несмотря на то что динамика влаги в растении зависит главным образом от климатических условий, эти физиологические факторы оказали довольно чувствительное действие.

Взаимодействие лучше проявилось на люцерне чем на клевере или на райграссе. Водное и калиевое питания могут дополнить друг-друга в определенных пределах обеспечивая произрастание растений и выработку ими сухой массы.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ACHITOV M., 1961. Revue de la littérature relative à l'interaction entre le potassium et l'eau dans les plantes *Revue de la Potasse* (Communications mensuelles de l'Institut International de la Potasse, Berne, Suisse) Section 3, 15° suite, 1-16.

BLACK C. A., 1957. *Soil-plant relationships*, 309-311, Wiley, New York.

BLANCHET R., 1958. Énergie d'adsorption des ions minéraux par les colloïdes du sol et nutrition minérale des plantes, Thèse doctorat n° 4033, 131-132, Paris.

BLANCHET R., STUDER R., CHAUMONT C., 1962. Propriétés physico-chimiques des sols et alimentation potassique des plantes. *Ann. agron.*, sous presse.

BOUCHET R. J., 1961. Signification et portée agronomique de l'évapotranspiration potentielle. *Ann. Agron.* **12**, 51-64.

HALLAIRE M., 1960. Le problème du potentiel de l'eau dans le sol et de la disponibilité de l'eau pour la végétation. *Ann. Physiol., vég.*, **2**, 119-130.

HUDSON J. P., 1958. General effect of potassium on the water economy of plants, in *Potassium Symposium*, 95-108, Institut International de la Potasse, Berne.

TURC L., 1961. Évaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle. *Ann. agron.*, **12**, 13-50.

WALLACE, 1958. Potassium uptake with regards to soil moisture, in *Potassium Symposium*, 141-147, Institut ternational de la Potasse. Berne.

Ann. agron., 1962, **13** (2), 111-140.

631. 43 : 631. 452

RELATIONS ENTRE LES PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET LA FERTILITÉ DANS LES SOLS TROPICAUX

B. DABIN

Office de la Recherche scientifique et technique Outre-Mer, Bondy (Seine).

SOMMAIRE

Le présent travail comprend l'étude de plusieurs indices groupant les principales caractéristiques physiques des sols (stabilité structural, porosité), et montre quelques corrélations existant entre ces indices et la fertilité dans le cas de différentes cultures tropicales telles que le Riz, la Banane, le Cacao, le Coton.

I. — INTRODUCTION

L'étude de la structure nécessite l'appréciation de deux groupes de données ; les unes caractérisent l'état du sol à un instant donné, les autres sa variabilité, ou sa stabilité.

L'état structural d'une terre est déterminé par les facteurs intrinsèques tels que la texture, la richesse en matière organique, en bases, etc., et par une série de facteurs extrinsèques, facteurs biologiques (faune et action des racines), facteurs humains (travail du sol).

Quel que soit l'état instantané de la structure, celui-ci tend à évoluer vers un équilibre résultant du jeu des facteurs favorables, et des facteurs défavorables : c'est-à-dire l'instabilité de la structure, et l'intensité des agents climatiques (chutes de pluie).

Il est donc logique de distinguer, état structural et stabilité structurale.

Pour des végétations pérennes ou pour des conditions climatiques particulièrement agressives, voire même pour des irrigations abondantes, on doit observer une relation étroite entre l'état structural et la stabilité structurale.

Dans la mesure où l'état structural commande la végétation, une corrélation doit donc apparaître entre la croissance des plantes ou le rendement et la stabilité structurale.

On connaît les difficultés, que l'on éprouve à caractériser l'état physique du sol

en place ; au contraire, on sait que la stabilité structurale peut être appréciée par des méthodes de laboratoire. C'est dire que dans l'hypothèse où nous nous sommes placés, on pourrait juger de l'état structural du sol en place par des techniques d'utilisation commode.

Toutefois, les méthodes d'appréciation de la stabilité structurale ne donnent qu'une tendance, l'état final de la structure dépendant de la texture. Il était donc nécessaire d'ajouter aux techniques d'appréciation de la stabilité, des mesures reflétant les propriétés de l'état structural qui sera atteint asymptotiquement.

C'est ainsi que parmi les facteurs mesurables en relation avec la texture et la structure, nous avons déterminé différentes formes de la porosité :

a) *Porosité totale à saturation* : porosité d'un sol travaillé puis porté à saturation dans un excès d'eau.

b) *Porosité* correspondant à une force de succion de 1 000 g ou pF 3 ou *humidité équivalente.*

c) *Porosité* correspondant à une force de succion de 16 000 g ou pF 4,2 ou *point de flétrissement.*

II. — TECHNIQUES DE MESURE

1° *Stabilité structurale et perméabilité*

Les méthodes de mesure ont été décrites par S. HENIN ; nous en rappelons ici le principe essentiel :

L'instabilité I_s est donnée par la formule suivante :

$$I_s = \frac{A + L \text{ (maximum) pour } 100}{\frac{\text{Agr. air} + \text{Agr. Alcool} + \text{Agr. Benzène}}{3} - 0{,}9 \text{ Sable grossier.}}$$

Agr. air, alcool, Benzène : Pourcentage d'agrégats de diamètre supérieur à 0,2 mm obtenu par tamisage dans l'eau après divers prétraitements à l'alcool, au benzène et sans prétraitement

A + L p. 100 = Argile + Limon (maximum de dispersion obtenue en fonction des divers prétraitements).

Cet *indice d'Instabilité* est complété par une mesure de *perméabilité* effectuée à saturation dans un tube de verre, sur échantillon remanié. La terre tamisée au tamis de 2 mm est tassée sous un excès d'eau par le simple effet de quelques rotations horizontales rapides ; cette mesure est conventionnelle mais bien reproductible.

Pour l'étude des sols tropicaux, nous avons apporté une légère modification qui consiste à rajouter à la terre tamisée les divers graviers et gravillons, en proportion identique à celle du sol en place, ce qui permet d'obtenir dans le tube une densité apparente assez proche de celle que l'on peut mesurer sur un sol en place très humide.

Soit *K cm/heure* la vitesse de filtration dans le tube.

Il existe une relation linéaire très générale entre log. 10 I_s et log. 10 K, vérifiée en particulier par MONNIER, GRAS, COMBEAU et nous-mêmes sur des sols très divers.

Si les sols étudiés s'étalent sur une gamme de variation très étendue, ce qui est le cas dans l'étude présente, cette relation linéaire permet de regrouper les deux grandeurs en un indice unique que nous avons appelé S_t :

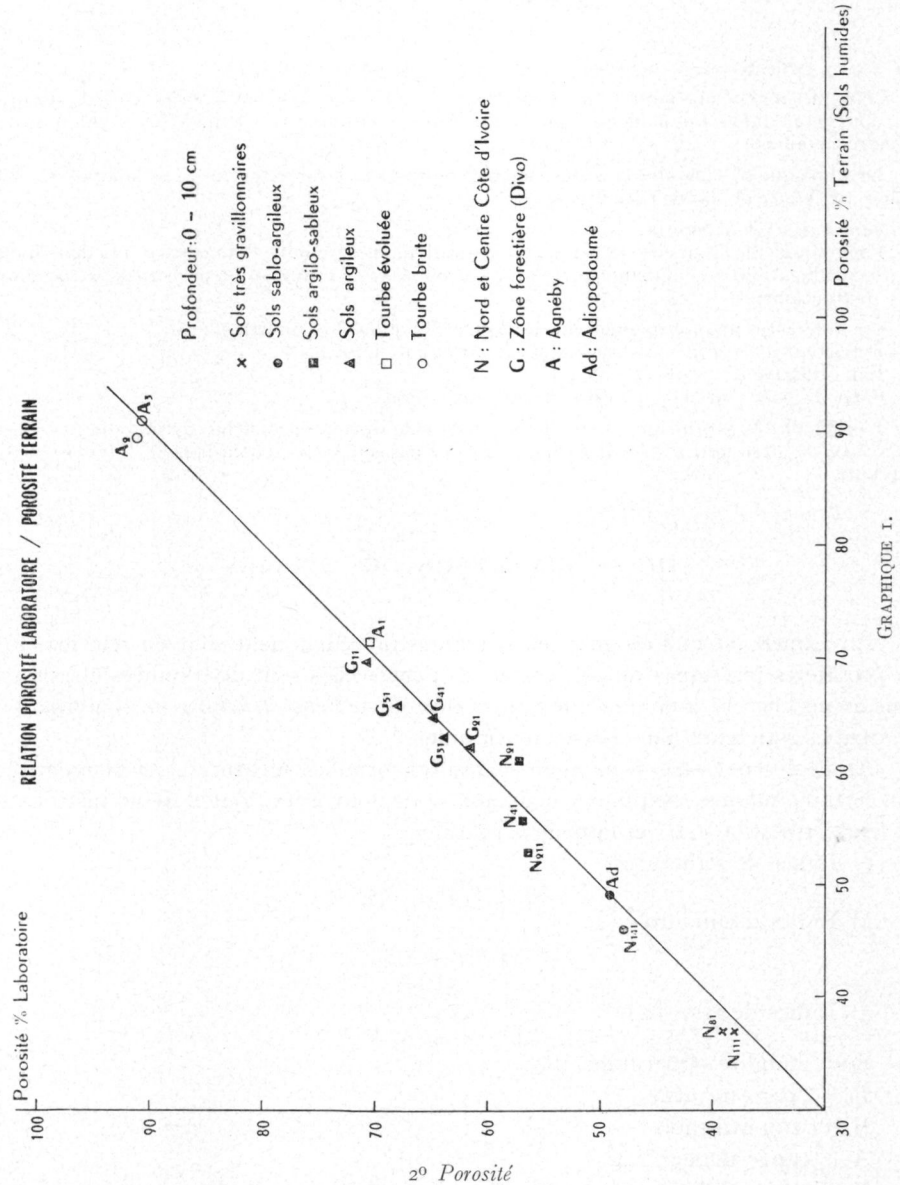
$$S_t = 20\ (2{,}5 + \text{Log } 10\ K - 0{,}837\ \text{Log } 10\ I_s)$$

S_t représente à la fois la mobilité de l'eau dans le sol et la stabilité structurale, cet indice permet,

(1) Voir Bibliographie

de différencier entre eux des sols ayant une même valeur de I_s mais dont la perméabilité peut varier en particulier en fonction de la richesse en ion calcium (cas des Terres Noires Tropicales).

S_t est donc considéré comme un indice global de Stabilité structurale.



GRAPHIQUE 1.

2° *Porosité*

A) *Porosité maximum à saturation.*

L'expérience a montré que la hauteur occupée dans le tube de verre par un poids donné de sol (dans la mesure de filtration) était bien reproductible d'un essai sur l'autre ; cela nous a donné l'idée de mesurer la densité apparente de la colonne de terre.

$$\frac{(S \times H)}{(P)}$$

P = poids sec
S = section du tube
H = hauteur du sol dans le tube.

et de déterminer ainsi la *porosité* du sol à saturation.

(La densité réelle est mesurée par la méthode au pycnomètre, la porosité est donnée par la formule :

$$\text{P p. 100} = 100 \left(1 - \frac{d_a}{d_r}\right)$$

P p. 100 = porosité ; d_a = densité apparente ; d_r = densité réelle).

Cette mesure est, une mesure conventionnelle, mais les résultats sont assez proches de ceux que l'on obtient en mesurant la densité apparente d'un sol en place très humide, en y enfonçant un cylindre métallique.

Le graphique n° 1 montre la correspondance des porosités sur le terrain et au laboratoire d'une gamme très étalée de sols de Côte d'Ivoire.

B) *Autres valeurs de la porosité.*

Pour compléter la mesure de porosité à saturation, on détermine l'humidité p. 100 du volume à *pF* 3 (centrifugation) et l'humidité p. 100 du volume à *pF* 4,2 (ressuyage à la presse à membrane sous 16 atmosphères).

Ces différentes mesures permettent de calculer les grandeurs suivantes :
Porosité utile = P_u = porosité totale à saturation — pF 4,2
Eau utilisable E_u = pF 3 — pF 4,2
Capacité pour l'air A = porosité totale à saturation — pF 3.

L'originalité et le principal intérêt de cette méthode résident dans le fait qu'*elle peut être réalisée entièrement au laboratoire et en série* à condition de ne pas écraser les échantillons de terre en cours de transport.

III. — RECHERCHE DES INDICES

En admettant que les grandeurs définies précédemment sont en relations avec les propriétés physiques du sol (certaines d'entre elles sont des données classiques), nous avons cherché à donner une valeur chiffrée de l'*état structural* en combinant ces différentes grandeurs dans plusieurs formules.

Après divers essais, nous avons choisi les formules suivantes, qui peuvent dans une certaine mesure s'expliquer mais non se démontrer et dont la seule justification est leur corrélation avec les faits de la pratique.

1) Indice de structure :

$$S_t \times \sqrt{P_u \times E_u} \qquad (1)$$

2) Indice d'humidité :

$$\frac{\sqrt{P_u \times E_u}}{S_t}$$

3) Indice de ressuyage :

$$A \times \text{Log } 10\ K$$

S_t = stabilité structurale
P_u = porosité utile
E_u = eau utilisable
A = capacité pour l'air
K = perméabilité

Signification des différents indices

I° $S_t \sqrt{\times P_u \times E_u}$ peut être considéré comme un indice de structure ; $\sqrt{P_u \times E_u}$ étant en effet en relation avec la richesse en colloïdes minéraux et

(1) Nous avons pris la racine carrée du produit ($P_u \times E_u$) pour conserver une expression du premier degré.

organiques, et S_t représentant leur stabilité. Une autre signification peut être donnée à cette formule. $\sqrt{P_u \times E_u}$ représente le potentiel de l'eau du sol et S_t sa mobilité d'où un rapport possible avec l'alimentation en eau de la plante dans les sols bien drainés.

II. $A \times \text{Log } 10\ K$ est applicable essentiellement aux sols mal drainés où l'eau est en excès et où la croissance des plantes est due principalement à la teneur en air du sol. A étant la limite des sols bien ressuyés, Log 10 K corrigeant cette valeur limite surtout dans le cas des sols peu perméables.

III $\frac{\sqrt{P_u \times E_u}}{S_t}$ Dans cette formule, le numérateur représente la quantité d'eau qui peut être emmagasinée et retenue par le sol, et le dénominateur est fonction de la perméabilité. Compte tenu de la fourniture en eau, un sol très poreux et peu perméable sera très humide, un sol peu poreux et très perméable sera peu humide, on peut considérer ce quotient comme un *indice d'humidité*.

En résumé

Les trois indices précédents ne doivent pas être considérés isolément, ce sont au contraire trois coordonnées qui permettent de situer avec ses différentes variantes, l'état physique intrinsèque d'un sol dont les éléments essentiels sont :

Structure — Humidité — Drainage.

IV. — APPLICATIONS PRATIQUES DES INDICES

Nous avons cherché à tester les indices :

1° en mettant les valeurs calculées des indices en relation avec des observations de l'état structural du sol en place ;

2° en établissant une corrélation entre la valeur de ces indices et les rendements de certaines cultures, ce qui permet d'effectuer une analyse statistique.

C'est ce test « rendement » qui constitue l'objet principal de cette note, l'étude des structures des principaux types de sol africains devant être traitée ultérieurement.

1° Sols des vallées alluviales du Niger

Culture du Riz

Sols étudiés :

Les sols étudiés proviennent des cuvettes alluviales du Niger dans la région de Niamey (Kolo, Koulou, Tillabéry, Firgoun, etc.). La culture principale est le riz (riz irrigué à contre-saison).

Ces sols ont l'avantage d'être très bien caractérisés du point de vue morphologique et structural.

Trois types principaux sont ici représentés.

Tableau des valeurs analytiques

La profondeur de sol étudiée est 0-25 cm.

Type de sol	Terres noires hydromorphes					Sols bruns et gris hydromorphes				
Numéro	311	101	81	111	331	151	171	661	591	361
Sable grossier	2,6	7,85	3,8	10,4	0,6	1,65	1,25	0,15	1	0,1
Agrégats alcool % ..	38,71	31,18	48,5	47,19	67,9	22,87	52,83	56,02	66,88	55,91
Agrégats benzène %	21,01	37,5	17,36	54,26	31,95	6,99	14,76	4,35	5,11	13,7
Agrégats air %	22,01	32,3	30,86	47,61	54,09	9,27	30,8	27,63	39,82	44,51
Moyenne %.....	27,2	34	32	49,8	51,1	13,05	33	29,5	37,5	38
Dispersion A + L %	30	22	24.5	8,5	30	42,5	54,5	61,5	53,5	41,5
I_s	1,24	0,86	0,86	0,22	0,59	3,7	1,72	2,11	1,46	1,09
Perméabilité K cm/h	2,92	3,25	7,7	5,45	25,2	1,85	1,66	2,1	4,05	3,6
Log 10 I_s	1,09	0,92	0,93	0,33	0,77	1,56	1,23	1,32	1,16	1,03
Log 10 K	1,46	1,51	1,88	1,73	2,4	1,26	1,22	1,32	1,6	1,55
S_t	61	64,8	69	79,1	85	49,2	53,2	54,2	62,6	63,8
Porosité maximum %	71	64	70	63,5	71	65,5	66	70	65	55,5
pF 3 % du volume.	38,7	38,4	34,8	36,3	37,6	29,5	43,5	33	31	38
pF 4,2 % du volume	16,8	15,4	15,5	19,5	22,5	13,2	17,4	19,8	19	26,5
Porosité utile P_u %.	54,2	48,6	54,5	44	48,6	52,3	48,6	50,2	46	39
Eau utilisable E_u %	21,9	23	19,3	16,8	15,1	16,3	16,1	13,2	12	11,5
Cap. pour l'air A %	32,25	25,6	35,2	27,2	33,5	36	32,5	37	34	27,5

Type de sol	N°	Rendement paddy	S_t	$\sqrt{P_u \times E_u}$	$S_t \times \sqrt{P_u \times E_u}$	A × Log 10 K
Terre noire de fond hydromorphe argilo-humifère	311	supérieur à 4 tonnes/ha	61	34,6	2 100	47,5
	101		64,8	33,5	2 150	41,6
	81		69	32,4	2 220	66
	111		79,1	27,2	2 150	67
	331		85	27,1	2 300	80
Sol brun et gris hydromorphes argileux	151	2 à 3 tonnes/ha	49,2	29,3	1 440	45
	171		53,2	28	1 490	39,5
	661		54,2	25,8	1 400	49
	591		62,6	23,5	1 460	54
	361		63,8	21,4	1 360	43
Sol gris limoneux de bordure	41	1 à 2 tonnes/ha	56,8	19,5	1 100	45
	891		51,8	22,5	1 160	30
Sols ferrugineux tropicaux sableux	231	nul	61,4	9,7	595	33
	231		60,3	9,7	595	38

Ce qui frappe dans ce tableau c'est la *constance de l'indice de Structure* $\left(S_t \times \sqrt{P_u \times E_u}\right.$ pour chaque) type de sol, malgré des valeurs assez variables de S_t (noter que S_t et $\sqrt{P_u \times E_u}$) varient en sens inverse.

a) *Sols Noirs hydromorphes* (hydromorphie totale prolongée) :

Sols Argilo-humifères ;
Sols à structure grenue à grumeleuse.
Fertilité : très bonne.

b) *Sols Bruns et Gris hydromorphes* (hydromorphie totale temporaire).

Sols Argileux ;
— Structure polyédrique.
Fertilité : moyenne.

c) *Sols à hydromorphie très temporaire :*

Sols gris limoneux de bordure ;
— Structure fondue assez compacte.
Fertilité : médiocre.
La fertilité est considérée sans engrais.

A titre d'exemple, nous donnons pour ces sols la suite complète des résultats analytiques obtenus ; pour les autres sols nous donnerons seulement la valeur des indices.

Interprétation des résultats. Graphique nº 2.

Le graphique nº 2 représente la corrélation entre les rendements et les indices, en décomposant les indices en leurs divers éléments.

La corrélation la plus élevée est obtenue entre le rendement et $S_t \sqrt{P_u \times E_u}$ ou indice de structure.

— avec $\sqrt{P_u \times E_u}$ la corrélation est encore significative mais moins élevée (action de la richesse en argile).

— avec A $\times$ Log 10 K, la corrélation n'est pas significative et elle est également très faible avec S_t.

Ces deux derniers résultats sont logiques ,en effet, il est bien connu que le riz peut prospérer dans des sols dispersés et mal drainés.

Remarque :

En ce qui concerne les deux premiers indices ils sont surtout en relation avec la richesse en argile et matière organique des sols qui agit également sur les rendements en riz.

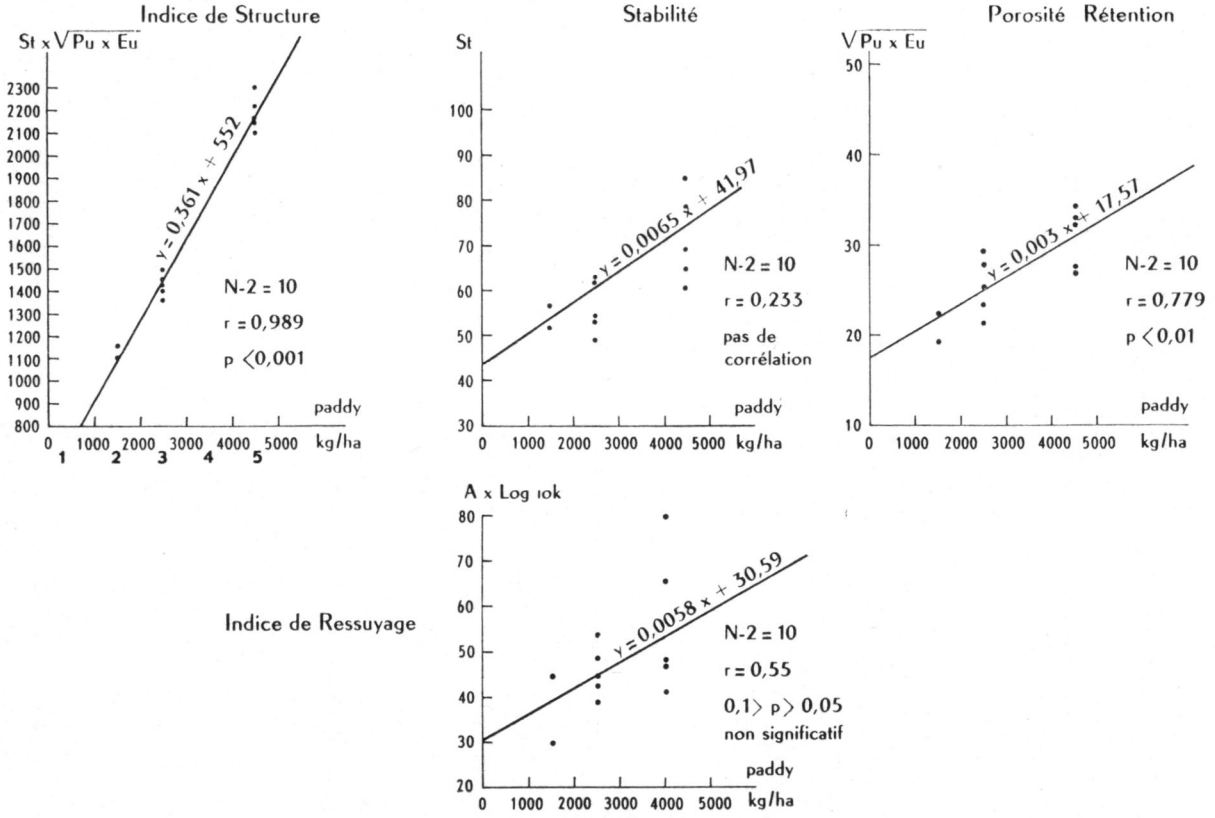
2º Sols de bananeraies de basse Côte d'Ivoire

En basse Côte d'Ivoire les bananeraies se trouvent dans des sols très divers, la pluviométrie, de 1 500 à 2 000 mm par an, permet cette culture sans irrigation dans des sols de plateau ou de pente bien drainés ; d'autre part, les terres d'alluvions plus basses sont également cultivées en bananeraie.

Nous avons pensé qu'il serait bon de séparer les deux catégories de sols en raison de leur grande différence au point de vue du régime de l'eau.

Dans le premier cas, la nappe phréatique est très profonde. Dans le second cas, elle est située entre 0,30 m et 1 m de profondeur.

ALLUVIONS DU NIGER — CULTURE DU RIZ



GRAPHIQUE 2.

A) *Sols où la nappe phréatique est profonde (plus de 2 m)*

Liste des plantations étudiées

Numéro	Type de sol et roche-mère	Emplacement
WS 31	Sol ferrallitique très lessivé de plateau sur schistes Birrimiens arkosiques.	Azaguié
Alé. 11	Sol ferrallitique très lessivé de plateau sur sable tertiaire.	Brofodoumé
Scaf. 31	Sol ferrallitique lessivé de bas de pente sur schistes.	Bongo
MM. 21	Sol ferrallitique de plateau sur granite.	Akoupé
Gel. 31	Sol alluvial — Haute terrasse.	Agboville
Gra. 11	Sol alluvial — Moyenne terrasse.	Sassandra
Alé. 21	Sol ferrallitique lessivé sur sable tertiaire — replat argileux.	Brofodoumé
Bos. 11	Sol ferrallitique de plateau sur granite.	N'Douci
Baf. 21	Colluvion de roches basiques — plantation ancienne.	Singrobo
Alé. 111	Sol ferrallitique de pente, lessivé, sur micaschistes.	Alépé
WS. 41	Sol ferrallitique lessivé de pente sur schistes.	Azaguié
Iro. 861	Sol ferrallitique de pente sur amphibolite.	Groh
Iro. 421	Sol ferrallitique de pente sur amphibolite.	Groh

Comme nous le remarquons, les échantillons ont été prélevés dans des plantations différentes sur des sols différents.

Le rendement moyen de grandes parcelles nous a été communiqué par les planteurs qui utilisent tous, de fortes doses d'engrais, et la même variété (*Poyo*).

Nous avons classé ces rendements en six grandes catégories, correspondant à des différences de végétation en relation avec des caractéristiques du sol en place ; étant donnée d'autre part la gamme très étendue des résultats, on peut penser que le facteur sol domine largement les autres facteurs de production plus ou moins accidentels.

Les catégories sont les suivantes :

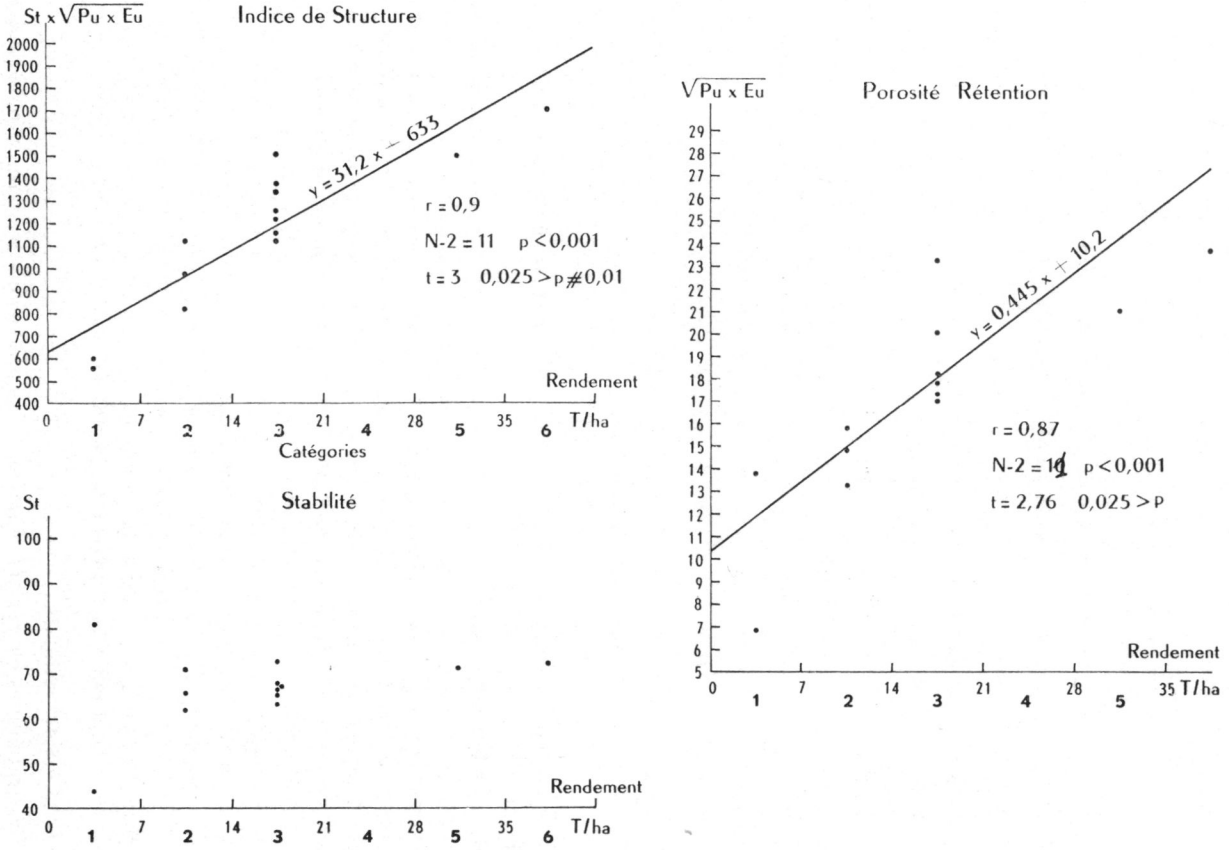
1 — mauvais 0 à 7 tonnes/ha
2 — médiocre 7 à 14 tonnes/ha
3 — moyen 14 à 21 tonnes/ha
4 — bon 21 à 28 tonnes/ha
5 — très bon 28 à 35 tonnes/ha
6 — exceptionnel supérieur à 35 tonnes/ha.

Interprétation des résultats :

Les graphiques n° 3 et 3*bis* montrent les corrélations existant entre le rendement d'une part et d'autre part :

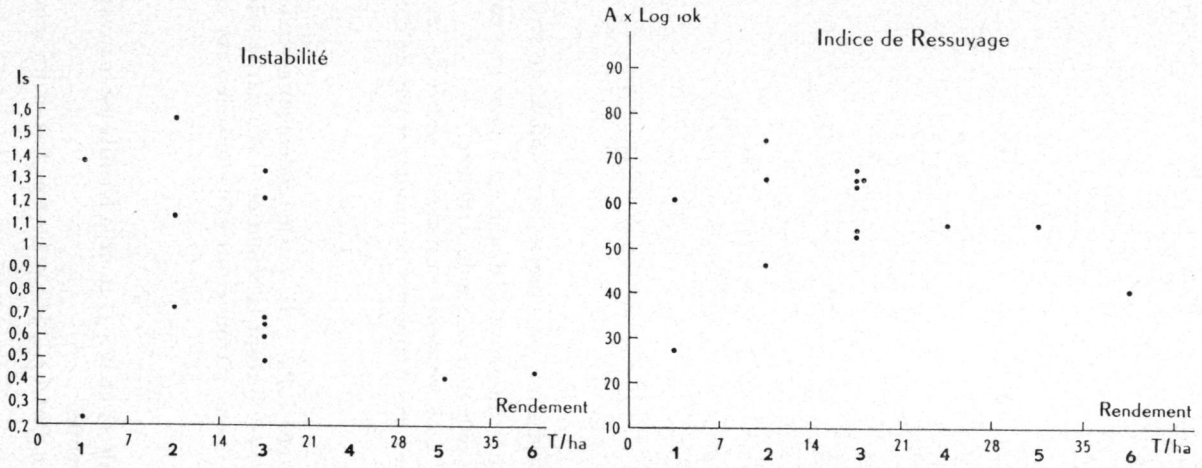
— l'indice de structure $(S_t \times (\sqrt{P_u \times E_u})$
— les éléments qui composent l'indice de structure $(\sqrt{P_u \times E_u})$ et (S_t)
— l'indice de ressuyage $(A \times \text{Log } 10\ K)$.

BASSE CÔTE D'IVOIRE – BANANERAIES – SOLS BIEN DRAINÉS



GRAPHIQUE 3.

BASSE CÔTE D'IVOIRE – BANANERAIES – SOLS BIEN DRAINES



GRAPHIQUE *3bis*.

Tableau des rendements et des indices

L'analyse du sol est effectuée sur 0-25cm de profondeur.

Numéro	Rendement catégorie	S_t	$\sqrt{P_u \times E_u}$	$S_t \times \sqrt{P_u \times E_u}$	A × Log 10 K
WS. 31	1	43,8	13,8	600	28
Alé. 11	1	81	6,9	560	60,5
Scaf. 31	2	62	13,2	820	46,5
MM. 21	2	65,4	14,8	980	65
Gel. 31	2	70,4	15,8	1 120	74
Gra. 11	3	63	17,9	1 120	64
Alé. 21	3	66,5	18,2	1 220	54
Bas. 11	3	66,8	17	1 150	53
Baf. 21	3	72,8	17	1 250	67
Alé. 111	3	65,2	23,2	1 510	65
WS. 31	3	67,3	20	1 350	65
Iro. 861	5	70,9	21	1 500	55
Iro. 421	6	72	27,3	1 710	40

La meilleure corrélation est donnée par l'indice de structure $S_t \times \sqrt{P_u \times E_u}$ $\sqrt{P_u \times E_w}$ (Indice de porosité) donne également une corrélation très significative, assez proche de celle de l'indice de structure.

. S_t, I_s, A × Log. 10 K (stabilité, instabilité , indice de ressuyage) d'après l'observation des graphiques, ces grandeurs ne montrent pas de corrélation avec les rendements.

Discussion des résultats.

L'action du facteur $\sqrt{P_u \times E_u}$ sur le rendement s'explique par le fait que dans les sols bien drainés c'est surtout la rétention d'eau par le sol qui est le facteur limitant du rendement ; nous retrouverons dans tous les cas cette notion de facteur limitant.

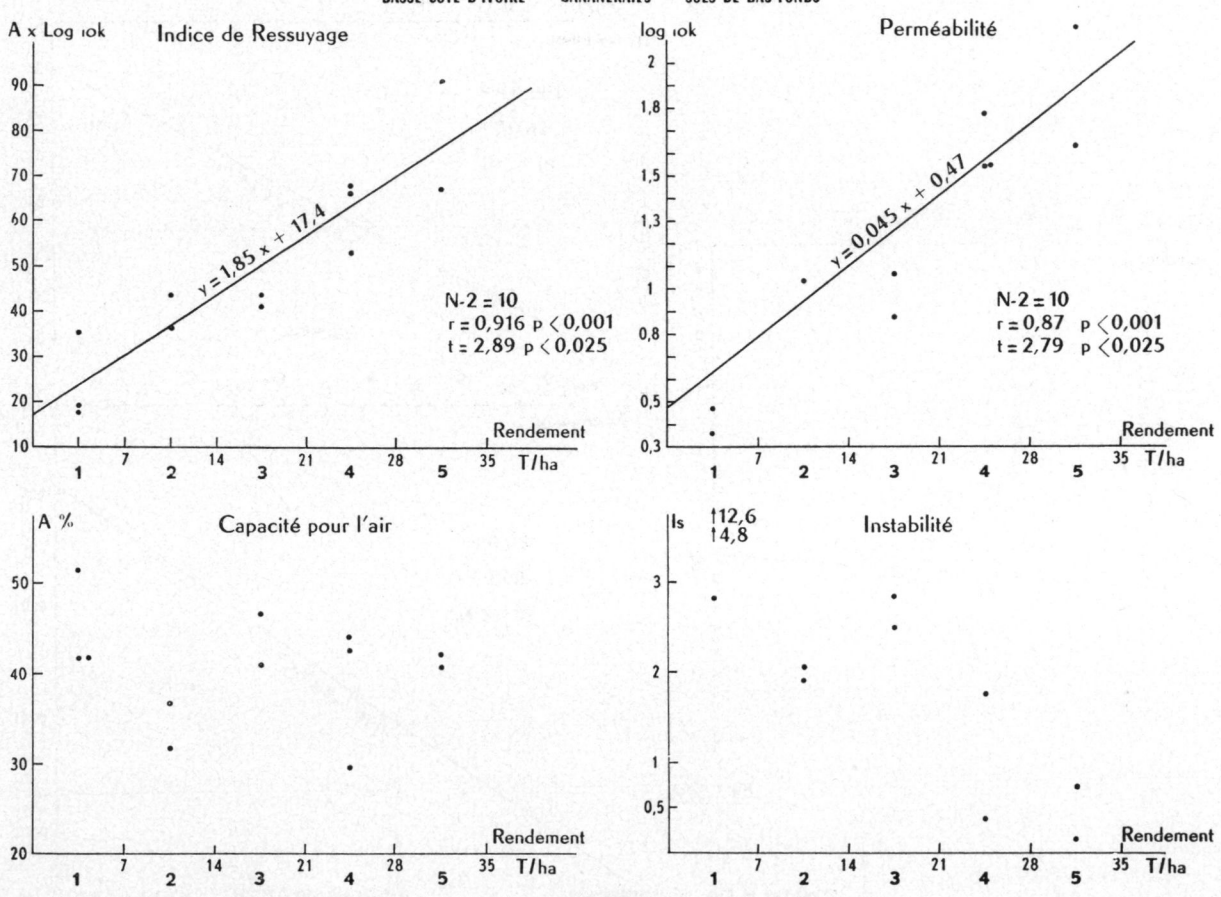
Remarque :

Les deux sols Alé 11 et WS 31 dont la fertilité est mauvaise, montrent des caractéristiques très différentes :

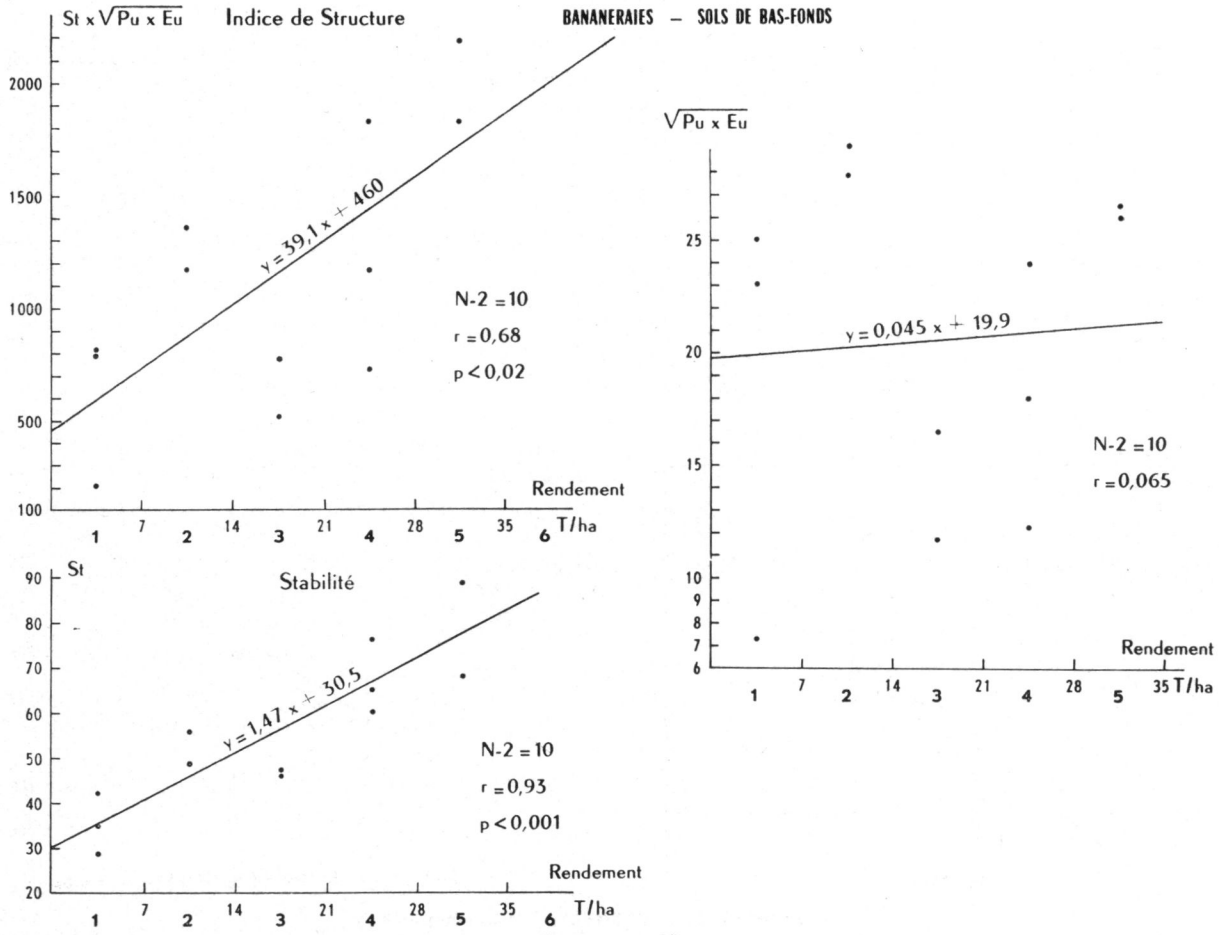
— Alé. 11 a un facteur $\sqrt{P_u \times E_u}$ très bas et un facteur de stabilité S_t très élevé.

— WS. 31 a un facteur $\sqrt{P_u \times E_u}$ moyen, mais une stabilité S_t mauvaise.

L'un est un sol sableux très meuble, l'autre un sol limoneux compact. Dans les deux cas, la structure est mauvaise pour des raisons différentes ; l'indice de structure donne deux valeurs basses bien groupées.


BASSE CÔTE D'IVOIRE – BANANERAIES – SOLS DE BAS-FONDS
A x Log 10k
Indice de Ressuyage
y = 1,85 x + 17,4
N-2 = 10
r = 0,916 p < 0,001
t = 2,89 p < 0,025
Rendement T/ha
log 10k
Perméabilité
y = 0,045 x + 0,47
N-2 = 10
r = 0,87 p < 0,001
t = 2,79 p < 0,025
Rendement T/ha
A %
Capacité pour l'air
Rendement T/ha
Is
12,6
4,8
Instabilité
Rendement T/ha

GRAPHIQUE 4.



GRAPHIQUE *4bis*.

B) *Sols où la nappe phréatique est peu profonde*

Liste des plantations étudiées

Numéro	Type de sol	Emplacement
B. D. M. T. 31	Sol de tourbière forestière — argile organique — 10 ans de culture.	Agnéby (Côte d'Ivoire)
Mot. 41	Alluvion de la Comoë — zone basse.	Motobé
Saba. 11	Tourbe un peu argileuse — cultivée depuis 22 ans.	Agnéby
Saba. 51	Tourbe évoluée — cultivée depuis 7 ans.	Agnéby
B. D. M. T. 21	Argile organique — terrain récemment défriché.	Agnéby
B. M. 21	Tourbe peu évoluée, en terrain mal drainé.	Agnéby
Bos. 11	Bas fond en région granitique.	Sassandra
Ge. 11	Argile organique — cultivée depuis 10 ans.	Agnéby
Saba. 61	Tourbe évoluée — cultivée depuis 20 ans.	Agnéby
Mot. 31	Terrasse alluviale moyenne.	Motobé
Or. 1	Flat alluvial sur roche basique — vieille plantation.	Singrobo
B. D. M. T. 31	Tourbe peu évoluée.	Agnéby

Tableau des indices

Numéro	Rendement catégorie	Capacité pour l'air A	Perméabilité Log 10 K	Indice de ressuyage A × Log 10 K	Indice de structure $S_t \times \sqrt{P_u \times E_u}$	Indice de porosité $\sqrt{P_u \times E_u}$	Stabilité S_t	Instabilité I_s
Mot. 41	1	41,8	0,86	35,5	810	25	42,2	12,6
B.D.M.T.21	1	51,5	0,36	18,5	210	7,35	28,8	18,5
B.M. 21	1	41,8	0,47	19	800	23	35	2,8
Mot. 31	2	36,5	1,04	38	1 360	28	48,8	2,05
Or. 1	2	31,6	1,42	44	1 110	31,6	56	1,9
B.D.M.T.41	3	41	1,07	44	780	16,6	46,6	2,85
B.D.M.T.31	3	46,6	0,88	41	510	11,6	46,6	2,5
Bos. 11	4	42,3	1,55	66	1 180	18	65,4	
Ge. 1	4	44	1,55	68	730	12,1	60,2	1,74
Saba. 61	4	29,5	1,77	52,5	1 840	24	76,5	0,34
Saba. 11	5	42	2,17	91	2 250	25	42,2	0,17
Saba. 51	5	409	1,64	67	1 830	26,5	68,6	0,72

Interprétation des résultats (graphiques nº 4 et 4 *bis*)

Les corrélations les plus élevées avec les rendements, sont obtenues pour :

— S_t (stabilité structurale) et $A \times Log\ 10\ K$ (indice de ressuyage)

— Log 10 K (perméabilité) présente une corrélation un peu moins élevée.

— I_s présente une corrélation d'après le graphique (mais non linéaire).

— $S_t \times \sqrt{P_u \times E_u}$ (indice de structure) présente une corrélation plus faible mais encore significative.

Les grandeurs qui ne présentent *aucune corrélation* avec les rendements sont : A (capacité pour l'air) non calculée et $\sqrt{P_u \times E_u}$ (indice de porosité).

Discussion des résultats.

Les résultats sont logiques ; ils sont inverses de ceux obtenus dans le cas des sols bien drainés.

Seul $St \times \sqrt{P_u \times E_u}$ (indice de structure) donne une corrélation dans les deux cas mais beaucoup plus faible dans le cas des sols mal drainés.

La *stabilité structurale* et l'*indice de ressuyage* sont réellement des facteurs limitants du rendement, ainsi que la perméabilité.

La *capacité pour l'air A* n'est valable qu'associée à la perméabilité.

Quant à la *porosité et à l'eau utilisable* $(\sqrt{P_u \times E_u})$, ce facteur ne présente aucune corrélation, l'eau étant ici en excès, ce qui est l'inverse des sols bien drainés.

Remarque :

Nous n'avons représenté que des sols cultivés, donc moyens, mais certains cas extrêmes de sols sableux de bas-fonds incultivables en bananeraie donnent les résultats suivants :

Porosité totale =	45 p. 100	
pF 3 =	4 p. 100	$S_t = 114$
pF 4,2 =	3 p. 100	$\sqrt{P_u \times E_u} = 6{,}5$
E_v =	1 p. 100	$S_t \times \sqrt{P_u \times E_u} = 740$
P_u = 42 p. 100		

Malgré un indice de stabilité très élevé, la fertilité est nulle. C'est l'indice de structure $S_t \times \sqrt{P_u \times E_u}$ qui est ici le facteur limitant.

3º Les sols a cacaoyers en basse Côte d'Ivoire

De même que les bananiers, les cacaoyers s'étendent sur une large gamme de sols en Côte d'Ivoire. Les conditions climatiques sont à peu près les mêmes, mais leur aire de culture est plus vaste car le problème du transport rapide est moins important que pour la banane ; ce sont également des plantes très sensibles à la sécheresse, qui peuvent souffrir du manque d'eau au cours des mois de décembre, janvier, février.

A l'inverse du bananier dont l'enracinement est superficiel, le cacaoyer possède un pivot qui peut descendre assez profond, d'où des possibilités meilleures d'alimentation en eau, mais également l'importance que revêt la structure des horizons inférieurs du sol.

Dans l'étude présente, nous sommes partis de cacaoyères existantes et normale-

ment développées, ce qui implique des sols ne présentant pas d'obstacle au développement radiculaire des arbres ; et dans ce cas, l'horizon supérieur 0 à 25 cm joue un rôle capital dans la fertilité générale du sol. Nous verrons d'ailleurs qu'il existe une relation entre la structure de l'horizon de surface et celle des horizons de profondeur.

Liste des plantations de cacaoyers

Numéro	Type de sol et roche-mère	Emplacement
Akr. 11	Sol ferrallitique très lessivé sur sable tertiaire, zone plane.	Akradio
At. 21	Sol ferrallitique typique sur schiste arkosique — pente.	Attobro
Rub. 11	Sol ferrallitique typique de pente sur granite.	Rubino
Abad. 21	Sol ferrallitique très lessivé de bas de pente sur sable tertiaire.	Abadjinkouté
N'D. 11	Sol faiblement ferrallitique de pente moyenne sur granite.	N'Douci
Br. 21	Sol ferrallitique très lessivé de pente moyenne sur sables tertiaires.	Brofodoumé
Iro. 111	Sol brun-jaune de bas de pente sur dolérite (hydromorphe).	Iroporia
Iro. 121	Sol brun-jaune de bas de pente sur micaschites (hydromorphe).	Iroporia
Or. 31	Sol faiblement ferrallitique de forte pente sur amphibolite.	Orumboboca
Ak. 21	Sol ferrallitique très lessivé de pente faible sur sables tertiaires.	Akoupé (Abidjan)
Hi. 531	Sol faiblement ferrallitique sur granodiorite, pente faible.	Hiré
Yao. 31	Sol ferrallitique typique de pente faible sur micaschites.	Yaobou
Zod. 11	Sol ferrallitique typique de zone plate.	Zodgi
Iro. 431	Terre brune de pente moyenne sur amphibolite.	Iroporia

Nous n'avons pas séparé les sols suivant leur drainage comme dans le cas du bananier ; nous avons des sols de pente et quelques sols de bas de pente hydromorphes, mais pas réellement de sols de bas-fonds.

Les plantations étudiées sont des plantations africaines bien entretenues dont un certain nombre sont contrôlées par le Service de l'Agriculture qui nous a communiqué les rendements.

Tous les rendements sont des rendements *sans engrais* ; ils correspondent, comme pour la banane à des différences de végétation visibles sur le terrain (diamètre des arbres, nombre de cabosses, etc.) et l'observation du sol en place suffit à établir le diagnostic de fertilité.

Nous avons distingué 5 grandes catégories de rendements :

1 — mauvais 0 à 300 kg /ha
2 — médiocre 300 à 600 kg /ha
3 — moyen 600 à 900 kg /ha
4 — bon 900 à 1 200 kg /ha
5 — très bon supérieur à 1 200 kg /ha

On peut discuter sur ces rendements qui dépendent beaucoup des conditions culturales ; mais ils sont valables dans les cas que nous avons choisis.

Tableau des indices

Numéro	Rendement catégorie	Indice de structure $S_t \times \sqrt{P_u \times E_u}$	Indice porosité $\sqrt{P_u \times E_u}$	Stabilité S_t	Instabilité I_s	Indice de ressuyage A × Log 10 K
Akr. 11	1	600	8,2	72	0,52	57
Abad. 21	1	850	9,85	87,6	0,56	90
At. 21	2	850	17,3	49,2	1,26	45,5
Rub. 11	2	830	11,6	70,7	0,45	49
N'D. 11	3	1 050	14,8	70	0,74	68
Ak. 21	3	1 380	11,4	96,8	0,31	87
Yao. 21	3	1 800	22	81,1	0,43	72
Zod. 11	3	1 660	22,5	74,1	0,44	53
Br. 21	4	1 300	12,8	101,3	0,07	81
Hi. 531	5	1 600	28	57	1,23	35
Iro. 431	5	2 300	23,4	99	0,18	78
Iro. 121	5	1 900	29,5	65,5	0,72	41
Iro. 111	5	1 550	25,5	61,5	1,06	24,5
Orumbo 31	5	1 550	21,5	71	0,34	51

Interprétation des résultats.

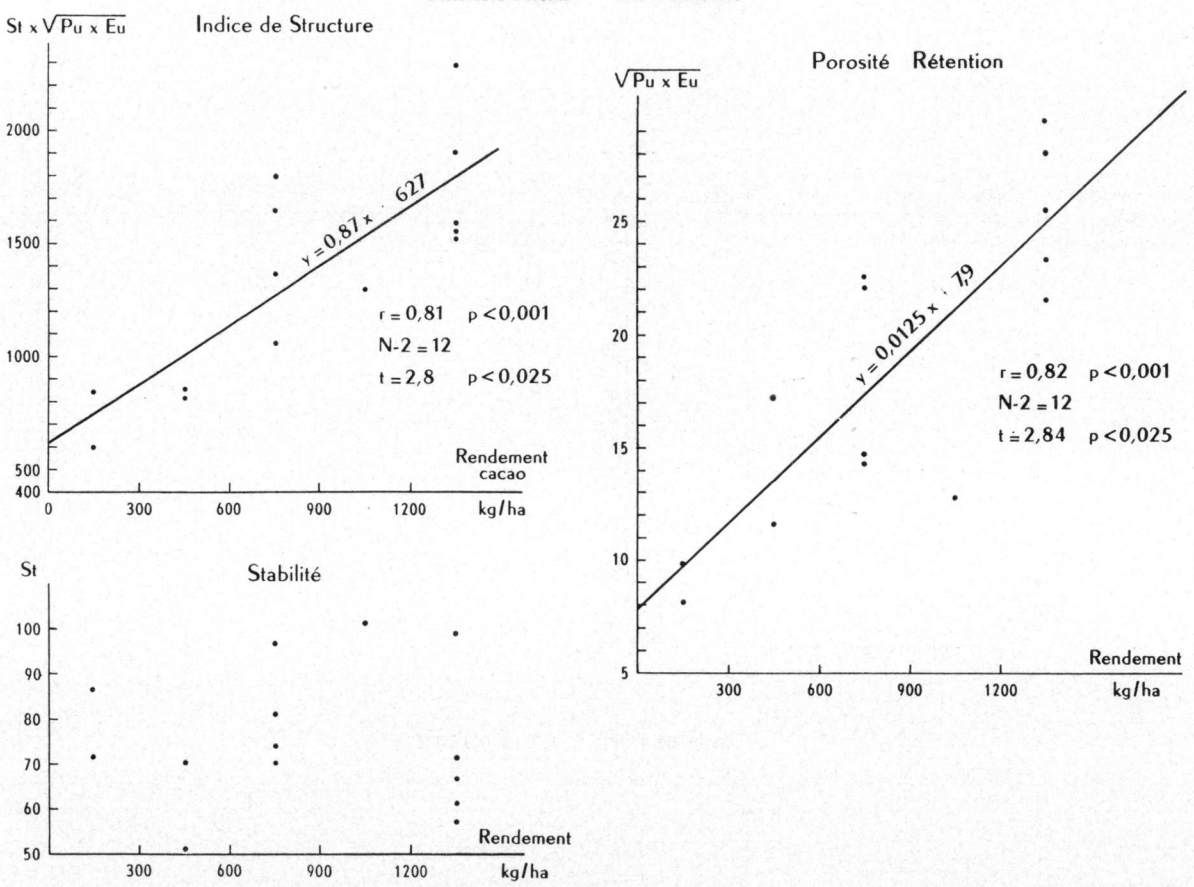
Les graphiques 5 et 5 *bis* montrent les corrélations entre les rendements d'une part et d'autre part : $(S_t \times (\sqrt{P_u \times E_u})$ (indice de structure) et ses composantes $\sqrt{P_u \times E_u}$ (porosité eau utilisable) S_t (stabilité), I_s (instabilité), en fin A × log 10 K (indice de ressuyage).

La corrélation est bonne pour $S_t \times (\sqrt{P_u \times E_u})$ et $(\sqrt{P_u \times E_u})$ le coefficient est équivalent dans les deux cas. Cela s'explique par le fait que dans tous les sols c'est la rétention d'eau qui est le facteur limitant du rendement.

Noter cependant dans le graphique $\sqrt{P_u E_u}$ un point aberrant (Br $_{21}$) correspondant à une zone de sables tertiaires sous climat très humide, ce point aberrant est bien regroupé dans l'indice de structure grâce à un indice de stabilité S_t élevé (101).

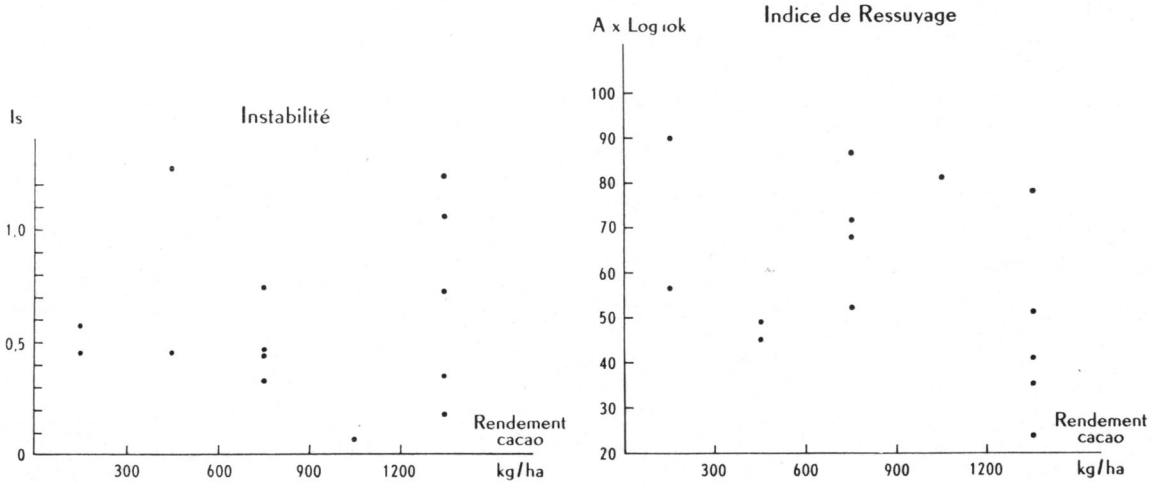
L'indice de stabilité S_t seul, ne donne pas de corrélation, de même que I_s et (A × log 10 K) (indice de ressuyage).

Ceci tient en partie à la nature même de la plante qui résiste très bien à l'engorgement temporaire même en sol hydromorphe.


BASSE CÔTE D'IVOIRE — SOLS A CACAOYERS
St x √Pu x Eu
Indice de Structure
y = 0,87 x - 627
r = 0,81 p < 0,001
N-2 = 12
t = 2,8 p < 0,025
Rendement cacao
kg/ha
St
Stabilité
Rendement
kg/ha
√Pu x Eu
Porosité Rétention
y = 0,0125 x - 7,9
r = 0,82 p < 0,001
N-2 = 12
t = 2,84 p < 0,025
Rendement
kg/ha

GRAPHIUQE 5.

BASSE CÔTE D'IVOIRE — SOLS A CACAOYERS

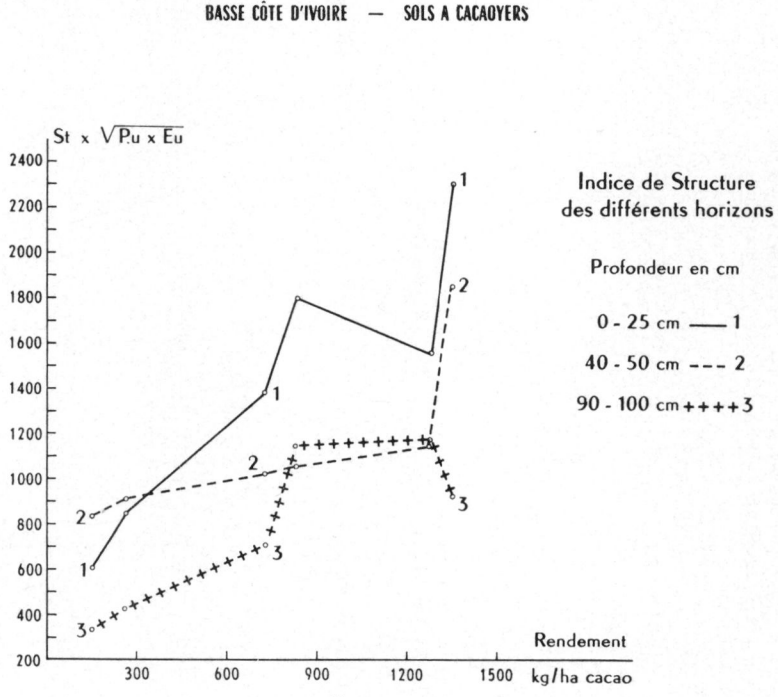


GRAPHIQUE 5*bis*.

Action des horizons de profondeur

Le graphique nº 6 montre la variation de l'indice de structure dans les horizons de profondeur à 0,50 m et 1 m ; il y a un parallélisme assez net entre la surface et l'horizon de moyenne profondeur ; l'horizon profond à 1 m montre une variation plus faible ; ce parallélisme explique la corrélation entre les rendements et la structure de l'horizon 0-25 cm dans les exemples choisis.

Ce parallélisme n'existe pas dans tous les sols, si l'on a à choisir un sol vierge pour y installer une cacaoyère, il faut tenir compte de la structure de l'horizon à 0,50 m de profondeur qui peut constituer un obstacle important pour la pénétration du pivot (sols gravillonnaires).



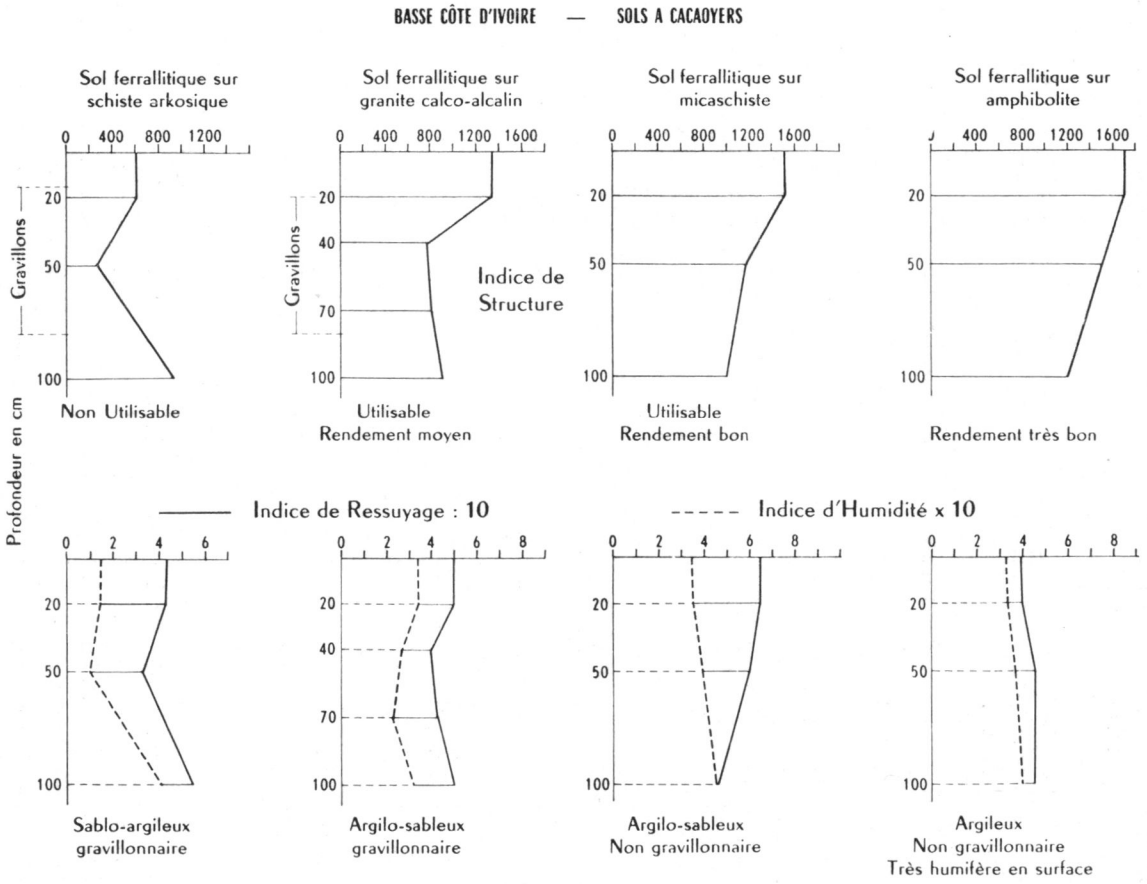
GRAPHIQUE 6.

Le graphique nº 7 montre un mode pratique de représentation de profils structuraux permettant de comparer divers types de sols.

La structure meilleure de l'horizon de surface humifère apparaît bien ; l'horizon gravillonnaire à 0,50 m présente un minimum très net, alors que l'on note un indice de structure assez constant dans l'argile tachetée polyédrique à 1 m de profondeur.

Les sols non gravillonnaires ne présentent pas de minimum mais une diminution constante de l'indice de structure de la surface vers la profondeur, au fur et à mesure que l'humus disparaît, la teneur en argile augmentant légèrement, la structure passant de grumeleuse à polyédrique.

Il semble que pour le cacaoyer le minimum d'indice de structure en surface est de l'ordre de 600, et en profondeur de l'ordre de 300. Mais pour avoir une plantation correcte, il faut au moins 1 300 en surface et 650 en profondeur.


BASSE CÔTE D'IVOIRE — SOLS A CACAOYERS
Sol ferrallitique sur schiste arkosique
Sol ferrallitique sur granite calco-alcalin
Sol ferrallitique sur micaschiste
Sol ferrallitique sur amphibolite
Gravillons
Indice de Structure
Profondeur en cm
Non Utilisable
Utilisable Rendement moyen
Utilisable Rendement bon
Rendement très bon
Indice de Ressuyage : 10
Indice d'Humidité x 10
Sablo-argileux gravillonnaire
Argilo-sableux gravillonnaire
Argilo-sableux Non gravillonnaire
Argileux Non gravillonnaire Très humifère en surface

GRAPHIQUE 7.

L'indice de ressuyage et l'humidité peuvent se représenter sur des graphiques analogues et fournissent des renseignements intéressants, compte tenu du climat et de la topographie ; noter une humidité basse dans les horizons gravillonnaires (0,50 m) et élevée dans l'argile tachetée à 1 m.

4° Les terres noires a coton du Togo

Avec les Terres Noires du Togo, nous avons un exemple net de sols chimiquement riches dont la fertilité dépend essentiellement des conditions physiques.

Bien que situées en zones de plateau, ces Terres Noires formées sur roche basique (Diorite), possèdent une hydromorphie interne dûe à la nature montmorillonitique ou illitique de l'argile et à la présence d'une proportion relativement importante de magnésium et de sodium dans le complexe absorbant ; certains sols drainent mal, rendant la croissance du Cotonnier difficile, cette plante étant très sensible à l'engorgement.

Sols étudiés.

— Les échantillons analysés proviennent tous de la Station de l'I. R. C. T. à Kolocopé (Anie-Mono) (la variété de Cotonnier cultivée est un Barbadense).

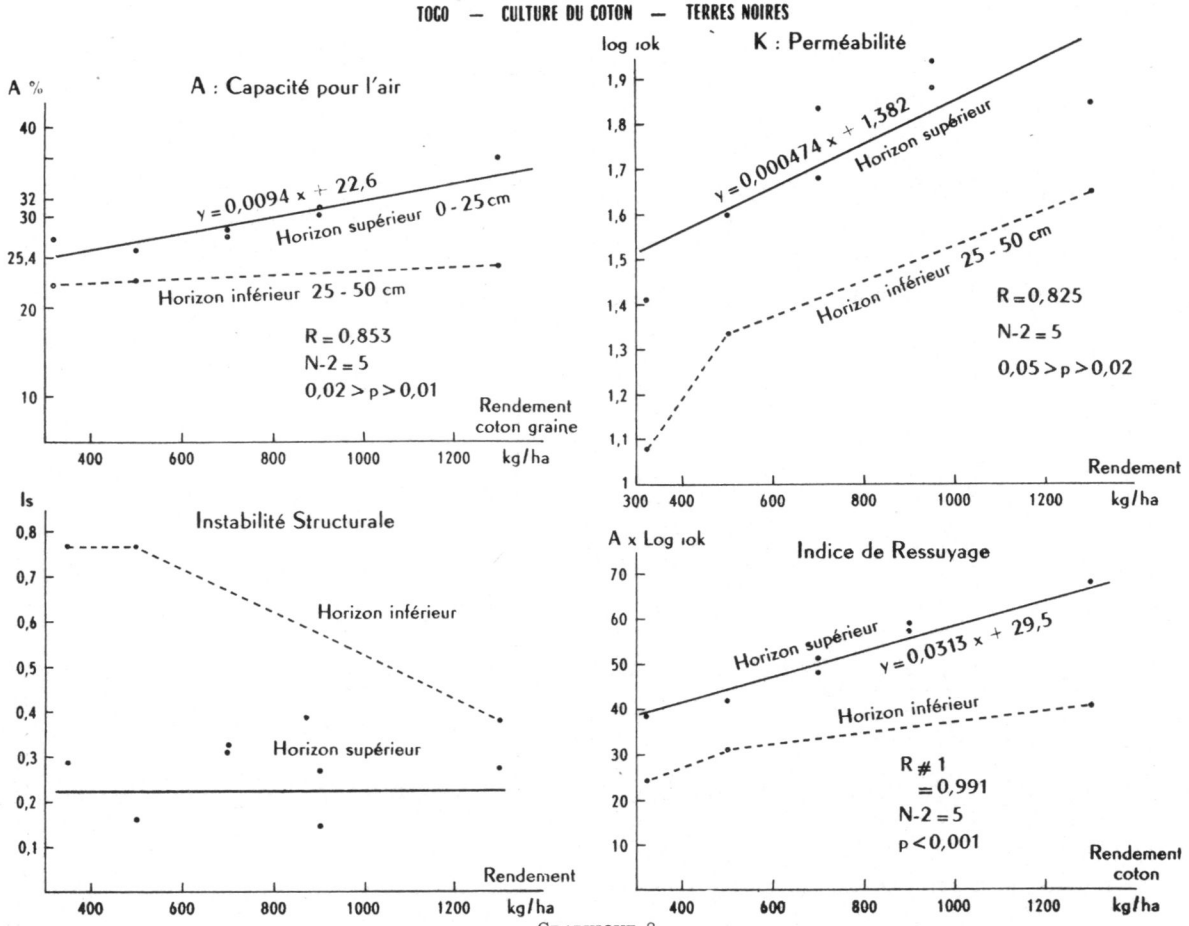
Tableau des rendements et des indices

Numéro	Profondeur en cm	Rendement kg/ha	Capacité pour l'air A	Log 10 K	A × Log 10 K	$S_t \times \sqrt{P_u \times E_u}$	$\sqrt{P_u \times E_u}$	I_s
111 *bis*	0-20	> 1 200	36,4	1,85	68	1 650	20,6	0,27
31	0-20	800-1 000	30,94	1,88	58	2 150	25,5	0,15
81	0-20	800-1 000	30,3	1,94	59	2 100	26	0,27
71	0-20	600-800	27,9	1,84	51	1 950	25	0,31
121	0-20	600-800	28,5	1,68	48	1 750	23,5	0,31
11	0-20	400-600	26,04	1,6	42	1 650	21,3	0,16
21	0-20	< 400	27,9	1,41	39	1 570	22,7	0,29
112	20-40	> 1 200	24,7	1,65	41	1 750	24	0,38
12	20-40	400-600	23,16	1,34	31,5	1 500	24,5	0,77
22	20-40	< 400	22,54	1,08	24,5	1 850	33,5	0,77

Interprétation des résultats.

Graphiques 8 et 8 *bis*.

L'indice de structure $S_t \sqrt{P_u \times E_u}$ présente toujours une valeur élevée supérieure à 1 600 ; nous avons donc dans tous les cas un sol intrinsèquement fertile, cependant, cette fertilité ne peut pas toujours se manifester en raison d'un drainage trop faible.

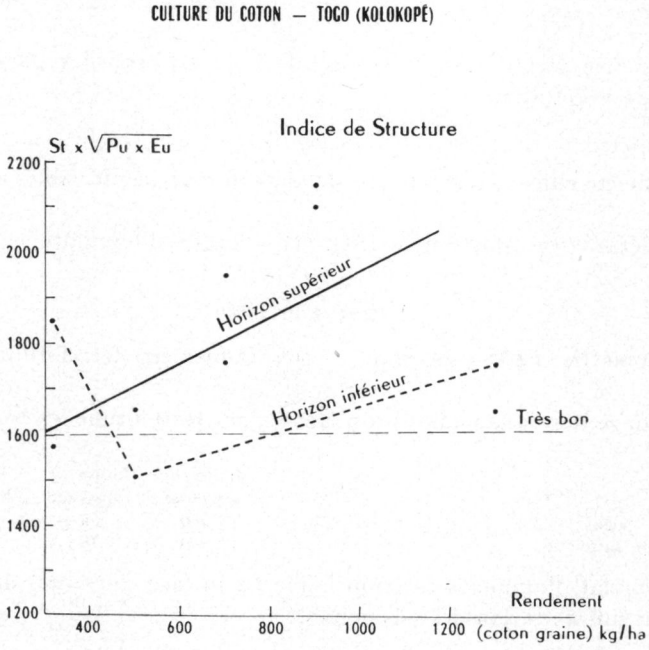

TOGO — CULTURE DU COTON — TERRES NOIRES
A : Capacité pour l'air
A %
y = 0,0094 x + 22,6
Horizon supérieur 0 - 25 cm
Horizon inférieur 25 - 50 cm
R = 0,853
N-2 = 5
0,02 > p > 0,01
Rendement coton graine
kg/ha
K : Perméabilité
log 10k
y = 0,000474 x + 1,382
Horizon supérieur
Horizon inférieur 25 - 50 cm
R = 0,825
N-2 = 5
0,05 > p > 0,02
Rendement
kg/ha
Instabilité Structurale
Is
Horizon inférieur
Horizon supérieur
Rendement
kg/ha
Indice de Ressuyage
A x Log 10k
Horizon supérieur
y = 0,0313 x + 29,5
Horizon inférieur
R # 1
= 0,991
N-2 = 5
p < 0,001
Rendement coton
kg/ha

GRAPHIQUE 8.

Il existe une corrélation significative entre le rendement d'une part, et A (capacité pour l'air) ainsi que Log 10 K (perméabilité) d'autre part et une relation quasi fonctionnelle entre le rendement et A $\times$ Log 10 K (Indice de ressuyage) (Les indices des horizons de profondeur sont sensiblement parallèles à ceux des horizons de surface).

Noter que l'instabilité I_s est toujours assez faible en surface et ne suit pas la perméabilité (sauf en profondeur).

Ces propriétés particulières (indice de structure bon, instabilité faible) font qu'il est possible, en agissant sur l'un des facteurs limitants (capacités pour l'air ou perméabilité) d'accroître fortement les rendements.



GRAPHIQUE 8*bis*.

Un travail profond du sol permet d'accroître A et augmente la production, le principal souci des agronomes de la Station est la mise au point des meilleures façons culturales. Si nous avions un mauvais indice de structure, un simple travail du sol ne suffirait pas, il faudrait également des amendements ; nous voyons donc comment cette étude systématique des indices permet non seulement de prévoir la fertilité mais également les techniques culturales à utiliser.

V. — INDICE D'HUMIDITÉ

L'indice d'humidité est calculé par la formule $\frac{\sqrt{P_u \times E_u}}{S_t}$ Il permet d'apprécier en valeur indiciaire l'humidité potentielle des différents sols et d'établir certains seuils de vocation culturale en fonction du climat ; mais nous ne donnerons ici que quelques exemples.

1° *Basse Côte d'Ivoire*

Végétation naturelle.

Sous climat très pluvieux 1 700 à 2 000 mm on observe plusieurs types de forêt dense : la forêt à « Turraeanthus » sur sables côtiers tertiaires et la forêt à « Mapania » sur schistes birrimiens arkosiques (voir publications de M. le Professeur MANGENOT).

La comparaison entre la forêt de Banco (sables) et la forêt de Yapo (schistes) est la suivante (0-25 cm) :

	Indice de structure	Indice de ressuyage	Humidité
Banco	1 120	92	0,133
Yapo	1 100	45	0,255

Sous un même climat, le sol de la forêt de Yapo est beaucoup plus humide, d'où la différence de végétation.

Culture bananière.

Sous ce même climat, certains sols de plateau sont incultivables en Bananeraie car trop secs.

ex : Coopérative de Brofodoumé (AG. 11) — Indice d'humidité = 0,084.

2° *Région de Divo*

— pluviométrie 1 400-1 500 mm — sols faiblement ferrallitiques sur roches basiques.

Sur sol rouge, les bananeraies prospèrent ; sur terre brune les bananiers dessèchent.

	Indice de structure	Indice de ressuyage	Indice d'humidité
Sol rouge	1 500	55	0,3
Terre brune	2 300	78	0,23

Sous ce climat, l'humidité est trop faible en surface (0-25 cm) dans les Terres brunes, elle est suffisante dans les sols rouges.

3° (*Région d'Akoupé — Agboville*)

Pluviométrie 1 300-1 400 mm.	humidité
Plantation de Mamini, Bananeraies souffrant de la sécheresse	0,22
Plantation Gelin, Bananeraies résistant à la sécheresse	0,5

4° *Autres exemples* :

Sol de plateau cuirassé, très sec	0,057
Horizon profond d'un sol alluvial très humide	0,72

VI. — RÉSUMÉ ET CONCLUSION

Nous avons étudié, pour un certain nombre de cultures : Cacaoyer, Bananier, Cotonnier et Riz, ainsi que pour différents types de sol et différents climats, l'action des propriétés physiques du sol sur les rendements ; il semble que suivant les positions

topographiques (sol de plateau ou de bas-fond) les cultures (plantes sensibles ou résistantes à la sécheresse ou à l'engorgement), il existe dans chaque cas un facteur limitant du rendement qui peut être soit la porosité et l'eau utilisable, soit la stabilité structurale et la perméabilité.

La combinaison de ces facteurs en un indice de structure $(S_t \times \sqrt{P_u \times E_u})$ a l'avantage de donner dans tous les cas une indication valable sur la fertilité des sols, plus ou moins indépendante de la position topographique, de la culture et même du climat.

Nous n'avons pas traité ce problème du climat qui nécessiterait une étude approfondie, mais signalons seulement que pour la culture non irriguée du Coton et du Maïs au Niger (550 mm de pluie environ) un facteur $\sqrt{P_u \times E_u} = 20$ semble un minimum (Sol Brun Steppique) alors que pour la culture du Bananier et du Cacaoyer en Côte d'Ivoire, la limite se situe aux environs de 12 pour 1500 mm de pluie et est plus basse encore pour 1700 à 1800 mm. Dans tous les cas, le facteur $S_t \times \sqrt{P_u \times E_u}$ donne une limite d'environ 900, au-dessous de laquelle le rendement devient mauvais.

Nous donnons ici une échelle des indices de structure pour les différentes cultures :

	Cacaoyer	Bananier		Riz	Coton (1)
		bien drainé	mal drainé		
Très bon	1 650-1 950	1 520-1 760	1 600-1 860	2 000-2 300	> 1 600
Bon	1 400-1 650	1 300-1 520	1 300-1 600	1 600-2 000	1 300-1 600
Moyen	1 150-1 400	1 180-1 300	1 000-1 300	1 250-1 600	1 000-1 300
Médiocre	900-1 150	860-1 180	750-1 000	900-1 250	800-1 000
Mauvais	600-900	640-860	450-750	550-900	600-800

(1) Les indices de structure du coton proviennent de la comparaison de divers types de sol du Niger de fertilité variable.

Dans l'ensemble, il existe une assez bonne correspondance entre les cultures, le facteur $S_t \times \sqrt{P_u \times E_u}$ peut donc être considéré comme une caractéristique du *sol* relativement indépendante de la culture, du climat, de la topographie.

Cet indice ne peut cependant être utilisé seul, il a besoin d'être complété par *l'indice de ressuyage* (cas des sols à nappe phréatique proche de la surface, ou à engorgement interne) et par l'*indice d'humidité* (cas des sols bien drainés) ; l'interprétation de ces deux indices complémentaires est essentiellement fonction du climat, de la topographie et de la plante et permet d'indiquer des seuils aux dessous des quels telle ou telle culture n'est plus possible, ou bien nécessite des travaux d'irrigation, de drainage, de travail du sol, etc. ; dans certains cas, l'indice de ressuyage constitue le facteur limitant du rendement à condition que l'indice de structure soit bon.

En Afrique tropicale, la notion de vocation culturale est toujours valable en raison de la nécessité de produire dans les meilleures conditions économiques possibles, donc de rechercher au maximum la meilleure adaptation des cultures au sol dans les différents climats.

Les facteurs physiques sont les éléments essentiels de cette vocation culturale, *l'indice de structure* indiquant la fertilité générale, l'indice de ressuyage et l'indice d'humidité permettant d'adapter les cultures en fonction du climat et de la topographie.

Au terme de cette étude, il convient de souligner le sens que nous attribuons à nos résultats.

Les associations de données que nous avons utilisées présentent un caractère logique et s'il est possible que l'on puisse modifier quelque peu la façon de les associer, il semble qu'elles constituent des données complexes présentant une valeur globale. La valeur des corrélations obtenues constitue en elle-même un jugement ; il est vraisemblable que dans les mêmes conditions de milieu on retrouvera en moyenne des résultats du même ordre ; elles constituent donc un élément de diagnostic dans le cadre naturel où elles ont été établies.

Le fait que les groupes de valeurs utilisées varient d'une culture à l'autre montre par contre qu'il faudra, vraisemblablement les modifier si l'on veut étendre cette méthode de diagnostic à d'autres milieux à et d'autres cultures ; il est probable que dans la mesure où on voudra les appliquer dans des régions à climat moins agressif et à des cultures annuelles où l'état de la structure est fortement influencé par le travail du sol, leur valeur de diagnostic se trouvera réduite. Par contre, il est vraisemblable que pour les cultures pluriannuelles et les cultures pérennes, ces indices puissent présenter à nouveau un certain intérêt, même sous les climats tempérés.

Reçu pour publication en février 1962.

SUMMARY

THE RELATIONSHIPS BETWEEN PHYSICAL PROPERTIES AND FERTILITY OF TROPICAL SOILS

Soil structure in a tropical climate corresponds to an equilibrium and may be evaluated from laboratory measurements of structural stability and certain porosity values.

These laboratory measurement may be expressed by indices giving an overall picture of the different physical properties of the soil.

$$\text{Structural index} = \text{St} \times \sqrt{\text{Pu} \times \text{Eu}}$$

$$\text{Moisture index} = \frac{\sqrt{\text{Pu} \times \text{Eu St}}}{\text{St}}$$

$$\text{Index of drying} = \text{A} \times \log \text{K},$$

where St = structural stability, Pu = useful porosity, Eu = available moisture, A = air capacity, and K = permeability.

There was a correlation between crops yields and these indices. For rice grown in the Niger region, the structural index provided the best correlation while the index of drying had no significance.

A similar result was obtained with cacao plantations at the Ivory Coast, and with banana grown on well-drained soil.

For banana grown on poorly drained soil, the indices of drying ans structural stability showed the best correlation with yields ; the same was true for Cotton grown in the black montmorillonitic soils of Togo.

The moisture index is useful in estimating the drought resistance of crops in relation to the climate.

Соотношения между физическими свойствами тропических почв и их плодородностью.

Д. ДАБЕН — (О. Р. С. Т. О. М. — Бонди).

Структура почвы тропического климата соответствует определенному равновесию и ее можно оценить при помощи лабораторных мерил : прочность структуры и некоторые особенности порозности.

Мерила эти можно сгрупировать в несколько показателей (индексов) дающих общее представление о различных физических свойствах почвы.

Показатель структуры $St \times \sqrt{Pu \times Eu}$.

Показатель влажности $\frac{\sqrt{Pu \times Eu}}{St}$

Показатель стекания $A \times \text{Log } 10\ K$

St = Прочность структуры;
Pu = Порозность;
Eu = Потребленная влага;
A = Воздухоемкость;
K = Проницаемость.

Между этими индексами и урожайностью различных культур были установлены соотношения.

Наилучшее соотношение для культур риса в Нигерии дал индекс структуры. Индекс стекания напротив, не имеет значения.

Для культур какао на побережьи Слоновой Кости играют роль теже показатели что и для культур банана на хорошо продренированных почвах. В случае культур банана на плохо осушенных почвах наилучшее соотношение с урожайностью дали показатели стекания и прочности структуры. Тоже самое наблюдалось по отношению к культурам хлопка на монтмориллонитных черноземах в Того.

Индекс влажности позволил определить устойчивость культур к засухе в данном климате.

ZUSAMMENFASSUNG

BEZIEHUNGEN ZWISCHEN DEN PHYSISCHEN EIGENSCHAFTEN UND DER FRUCHTBARKEIT DER TROPISCHEN BÖDEN

Die Bodenstruktur im Tropenklima entspricht einem Gleichgewicht und lässt sich durch Messungen im Laboratorium (Stabilität der Struktur und einige Porositätswerte) erfassen.

Diese Messungen im Laboratorium können in Indexen zusammengefasst werden, die global die verschiedenen Eingenschaften des Bodens ergeben.

Strukturindex $St \times \sqrt{Pu \times Eu}$

Feuchtigkeitsindex $\frac{\sqrt{Pu \times Eu}}{St}$

Abstrocknungsindex $A \times \log 10\ K$

St = Strukturstabilität
Pu = benutzbare Porosität
Eu = benutzbares Wasser
A = Kapazität für Luft
K = Durchlässigkeit

Korrelationen wurden zwischen Ertrag und Indexen ermittelt.

Im Falle von Reiskulturen im Niger gibt der Strukturindex die beste Korrelation.

Der Abtrocknungsindex ist nicht von Bedeutung.

Die Kakaokultur an der Elfenbeinküste gibt das gleiche Resultat, genau wie die der Bananen auf gut drainiertem Boden.

Für Bananenkultur auf schlecht drainiertem Boden gitb der Abtrocknungsindex und die Strukturstabilität die besten Korrelationen mit den Erträgen.

Das gleiche gilt für die Baumwollkulturen in den schwarzen Montmorillonitböden des Togo.

Der Feutchtigkeitsindex erlaubt die Widerstandsfähigkeit der Kulturen gegen Trockenheit je nach Klima zu erfassen.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

de BOODT M., de LEENHEER, 1958. Soil structure index and plant growth. *Proc. Intern. Symp. Soil Structure, Ghent.*

BOYER J., COMBEAU A., Étude de la stabilité structurale de quelques sols ferrallitiques de République Centrafricaine. *Sols Afri.* **5**, 5-42.

COMBEAU A., 1960. Quelques facteurs de la variation de l'indice d'instabilité structurale dans certains sol ferrallitiques. *C. R. Acad. Agric.* 109-115.

COMBEAU A., 1960. Observations sur certains facteurs de la rétention d'eau par le sol pour diverses valeurs remarquables du pF. *Rapport O. R. T. S. O. M.*

DABIN B., 1956. Étude des propriétés physiques et chimiques des terres noires de la Station I. R. C. T d'Anié Mono (Togo). *Coton Fibres Trop.*, **11**, 1-8.

DABIN B.,1957-1958. Rapport de mission au Niger 1957. Étude Pédologique du Niger Central, 1958. Rapports inédits ORSTROM.

DABIN B., 1958. Étude physique et chimique des essais d'engrais sur cacaoyères en basse Côte d'Ivoire. Rapport inédit ORSTOM.

DABIN B., 1959. Utilisation d'un indice de structure pour la détermination de la qualité physique des sols tropicaux. *Rapport inédit ORSTOM*, 1959. *C. R.* 7e *Congr. Intern. Sci. Sol*, Madison.

DABIN B., LENEUF N., 1960. Les sols de bananeraies de la Côte d'Ivoire. Fruits nº 1, 3-27 ; nº 2, nº 3.

HENIN S., FEORODOFF A., GRAS R., MONNIER G., 1961. Le profil cultural (principes de physiques du sol)

LENEUF N. de LA SOUCHÈRE P. DABIN B., 1957. Contribution à lé'tude pédologique de la région nord est de Divo (Côte d'Ivoire). Rapport ORSTOM, Édition Cobafruit, Abidjan.

MAYMARD J., COMBEAU A., Effet résiduel de la submersion sur la structure du sol. *Sols Afri.* **5**, 123-48.

Ann. agron., 1962, **13** (2), 141-174.

634. 25 : 581. 14 : 631. 43

QUELQUES OBSERVATIONS SUR LES RELATIONS ENTRE LES PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DU SOL ET LA CROISSANCE DU PÊCHER DANS LA VALLÉE DU RHÔNE, ENTRE VIENNE ET VALENCE

R. GRAS
avec la collaboration technique de J. OUDARD

Laboratoire d'Étude des Techniques culturales,
Centre national de Recherches agronomiques, Versailles (Seine-et-Oise).

SOMMAIRE

L'étude des sols des vergers de pêchers d'une région de la Vallée du Rhône a permis de montrer l'influence des propriétés physiques du sol sur la vigueur des arbres. Ce travail a été conduit d'une part en examinant, sur une coupe de sol proche de l'arbre, le comportement des racines, d'autre part en reliant les caractéristiques du sol ou de l'enracinement à la vigueur des parties aériennes. On a pu mettre en évidence, par voie statistique, des relations liant la vigueur à la texture, aux propriétés structurales et à leurs conséquences, à la profondeur d'enracinement et aux capacités de réserve en eau. La préparation du sol avant plantation fait l'objet d'un examen particulier.

I. — INTRODUCTION

Dans le domaine de la production fruitière, l'importance grandissante de la concurrence tant sur le plan national qu'international accentue l'importance de la rentabilité de la production. Cette rentabilité dépend des conditions économiques, mais aussi du prix de revient du fruit rendu « bord verger ». Ce prix de revient peut être très différent selon les situations et cela pose le problème de l'influence du milieu (climat, sol) sur la production.

Pour ce qui est du sol, les propriétés physiques conditionnent son exploitation par les racines et le fonctionnement de ces dernières. Elles constituent des caractéristiques quasi permanentes du sol, et il convient qu'elles soient les meilleures possibles pour les vergers établis pour de nombreuses années. Une connaissance plus approfondie de l'influence des propriétés physiques du sol sur la vigueur devrait permettre

une meilleure adaptation des espèces au sol et une amélioration des terrains en vue de l'obtention de rendements plus élevés et plus réguliers.

L'étude des relations vigueur-propriétés physiques du sol nécessiterait l'installation de nombreux vergers expérimentaux sur des sols bien déterminés. Un tel programme pratiquement irréalisable peut être remplacé par une étude des sols des vergers existants. Les résultats préalablement obtenus sur le Pommier dans la Sarthe (R. GRAS, 1961) nous ont conduit à utiliser cette méthode pour le Pêcher. Aussi avons-nous accepté l'offre que nous ont fait certains C. E. T. A. (1) de la Vallée du Rhône de mettre leurs vergers de Pêchers à notre disposition. Il s'agissait de vergers situés sur la rive gauche du Rhône entre Vienne et Valence, pour la plupart plantés sur franc. Aussi tous les résultats obtenus sont-ils valables uniquement pour ce porte-greffe. L'âge des Pêchers s'échelonnait entre 3 et 23 ans. Les arbres étaient plantés souvent après un labour de défoncement, la plupart du temps sans fumure de fond.

Il nous faut préciser le sens du mot *sol* tel qu'il sera compris dans cette étude. Nous abandonnons la distinction entre sol et sous-sol pour cette définition : le sol est l'épaisseur de terre intervenant d'une façon directe (exploitation par les racines) ou indirecte sur le système radiculaire.

Après avoir indiqué la méthode employée pour l'observation, le critère de jugement de la partie aérienne de l'arbre et le mode d'interprétation des résultats, on étudie le rôle de la texture et des capacités de réserve en eau du sol. Tous au long de l'étude on attache une attention particulière aux sols caillouteux. L'efficacité des techniques de préparation du sol avant plantation fait l'objet d'une étude séparée.

II. — MÉTHODE D'ÉTUDE EMPLOYÉE

Il s'agit de déterminer la réaction des racines vis-à-vis des diverses propriétés physiques du sol et de voir les conséquences de ces réactions sur les parties aériennes de l'arbre. Pour juger de ce dernier point, il importe d'établir un critère de jugement des parties aériennes.

1° *Influence des propriétés physiques du sol sur l'enracinement.*

Elle se détermine par l'examen du profil cultural (HENIN S. et *al.*, 1960). Le profil cultural est un concept désignant à la fois la partie du profil pédologique modifiée par les techniques agricoles et l'enracinement de l'arbre. Son examen comprend l'étude de la texture, de la structure et de l'aération des divers horizons du profil. Les traces de travail du sol (labours de défoncement, façons superficielles d'entretien) sont notées, ainsi que l'état de la matière organique et l'activité de la faune du sol. C'est par rapport à cet ensemble que l'on étudie le comportement des racines. Certaines analyses ou tests sont nécessaires pour compléter cet examen.

L'analyse granulométrique est effectuée sans destruction de carbonates après traitement au chlorure de potassium et stabilisation de la suspension au citrate de sodium. La pipette de Robinson est utilisée pour la détermination des fractions fines. La teneur en matière organique est obtenue en multipliant la teneur en carbone dosée par la méthode ANNE (1945) par 1,72.

La stabilité structurale des sols est déterminée au moyen de 2 tests (HENIN S. et *al.*, 1958) : tamisage sous l'eau d'agrégats calibrés donnant l'indice S et mesure de la perméabilité sur échantillon remanié donnant l'indice K.

Les caractéristiques hydriques du sol sont déterminées au laboratoire, après ressuyage sous pression d'air des sols préalablement humectés, selon les techniques de RICHARDS L. A. (1941) et RICHARDS L. A et MILTON FIREMAN (1943). On a utilisé, selon les pressions, un appareil à membrane de cellulose ou à plaque de porcelaine.

Pour le calcul des réserves en eau, la densité apparente partielle de terre fine (BOURRIER J., 1959) a été déterminée ainsi que sa valeur complémentaire, la densité apparente partielle de cailloux.

(1) Centre d'Étude technique agricole.

2° Critère de jugement des parties aériennes de l'arbre

Le but de l'étude est de montrer en définitive l'action des propriétés physiques du sol sur le comportement des parties aériennes de l'arbre. Ceci suppose l'existence d'un critère de jugement. La meilleure solution serait évidemment de disposer du rendement cumulé de chaque arbre pour une certaine période. On se rendra facilement compte que la détermination de ce chiffre est pratiquement impossible, compte tenu des difficultés que l'on a à obtenir les rendements récents par vergers, d'ailleurs le plus souvent hétérogènes au point de vue sol. Ces difficultés conduisent à utiliser un critère d'accès plus facile, mais qui ne soit cependant pas dépourvu de valeur au point de vue rendement. La longueur de la circonférence du tronc répond à cette deuxième exigence, puisqu'elle est en corrélation avec le rendement (Mc. HATTON T. H., 1947). On peut par ailleurs y accéder facilement par mesure directe. Comme la longueur de la circonférence varie avec l'âge de l'arbre on considère le couple longueur de la circonférence du tronc — âge de plantation. L'âge de plantation est le temps

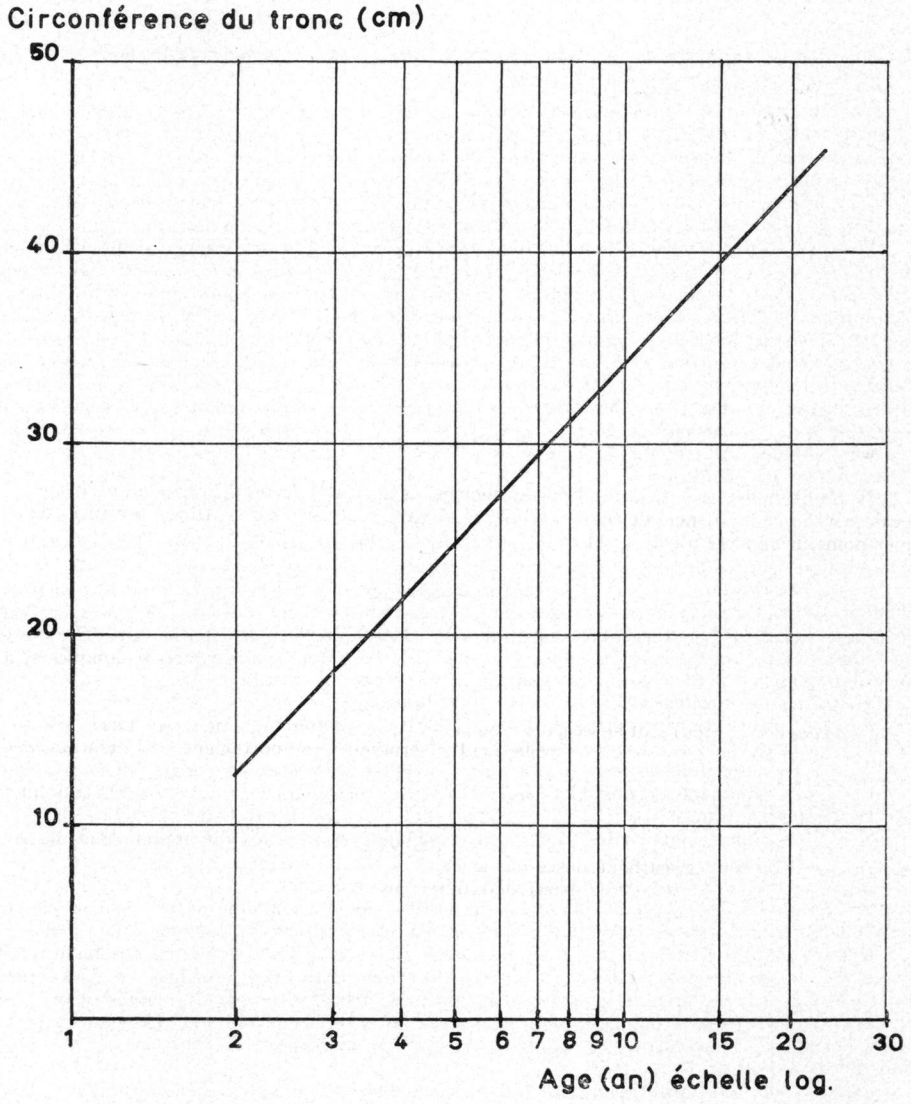


FIG. 1. — *Courbe moyenne de croissance du tronc des pêchers en fonction du temps — Vallée du Rhône*

écoulé (mesuré en an) entre l'époque de la plantation et celle de la mesure. L'utilisation de ce critère suppose que les diamètres initiaux des troncs sont statistiquement identiques, ce qui a été vérifié dans la majorité des cas.

Il est possible, lorsque l'on dispose de suffisamment d'observations, de tracer une courbe de croissance moyenne de la circonférence du tronc en fonction du temps. Par analogie avec ce qui a été fait pour le pommier dans une autre région (GRAS R., 1961), on a montré que l'équation de la courbe était susceptible d'un ajustement logarithmique. Par exemple pour l'ensemble des observations effectuées sur la rive gauche du Rhône entre Vienne et Valence, l'équation de la courbe de régression est :

$y = 30{,}80 \log x_1 + 3{,}56$

y = longueur de la circonférence du tronc (cm)

x_1 = âge de plantation. (an)

Cette courbe (fig. 1) rend assez bien compte de la croissance moyenne, sauf pour des âges de plantation inférieurs à 2 ans.

3° *Influence des propriétés physiques du sol sur la vigueur de l'arbre*

Une interprétation statistique est nécessaire du fait de la difficulté de comparer des arbres d'histoire culturale différente (pépinière, plantation, conduite du verger). Ceci implique l'étude de séries importantes d'observations auxquelles on applique les critères statistiques, en tâchant dans la mesure du possible, d'éviter les « biais » introduits par la structure particulière des échantillons.

L'interprétation se fait en examinant le résultat de l'intervention du facteur étudié sur le couple longueur de la circonférence du tronc-âge. Plusieurs cas peuvent se présenter.

Lorsqu'il s'agit par exemple de la comparaison de 2 catégories de sols, on s'efforce de montrer que les échantillons des circonférences des troncs des arbres poussant sur les 2 sols sont différents. Si les arbres avaient le même âge. il s'agirait d'une banale comparaison de moyennes. Mais la nécessité de comparer des arbres d'âges différents complique le problème. L'existence d'une régression entre la longueur de la circonférence du tronc et l'âge de plantation suggère l'utilisation de ces courbes pour la comparaison. On utilise alors les droites provenant de l'ajustement semi-logarithmique de ces courbes. Si les catégories de sol ont une action sur la croissance, cela se traduit, pour des arbres de mêmes diamètres initiaux, par des différences de rythme de croissance mesurées par le coefficient de régression b de l'équation $y = a + b \log x_1$.

y = longueur de circonférence du tronc.

x_1 = âge de plantation.

Le problème revient alors à une comparaison des coefficients de régression. Une telle comparaison n'est évidemment possible que dans certaines conditions :

— les arbres des 2 populations doivent avoir statistiquement les mêmes diamètres initiaux. Ceci implique que les droites de régression se coupent au voisinage de l'origine.

— les courbes de croissance doivent être établies pour le même intervalle de temps. Il est en effet hors de propos de comparer des segments de droites ajustés à des portions différentes des courbes de croissance. A la condition : intervalle de temps identique, il convient d'ajouter la condition : moyennes des temps analogues pour les 2 populations. Pour des raisons inhérentes à la constitution des échantillons on peut se trouver devant l'une des situations suivantes.

— pentes des droites significativement différentes :

intersection peu éloignée de l'origine (fig. 2, droites *a* et *b*) ; comparaison possible ;

intersection éloignée de l'origine (fig. 2, droites *a* et *c*) ; les valeurs initiales des circonférences des troncs sont différentes, ou l'échantillonnage défecteux. Pas de comparaison possible.

— pentes identiques :

ordonnées moyennes différentes : populations initiales différentes. Pas de comparaison possible ;

ordonnées moyennes identiques. Droites confondues.

La séparation des catégories de sol par un critère donné n'implique pas forcément que ce critère soit le seul à mettre en cause pour expliquer une différence de comportement des arbres.

Lorsqu'on peut attribuer des valeurs chiffrées (mesure ou test) au facteur étudié, la méthode des corrélations permet de le relier à la circonférence du tronc, critère de jugement des parties aériennes. La nécessité de considérer le couple circonférence du tronc y — âge de plantation x_1, impose le calcul d'une régression double entre y d'une part et x_1 et les facteurs étudiés d'autre part. Là aussi, l'existence d'une corrélation significative doit être interprétée avec les mêmes réserves que dans le cas précédent.

Les quelques résultats obtenus par cette méthode d'enquête et valables en moyennes, ne doivent pas faire oublier les difficultés d'interprétation de certaines observations individuelles, où l'on doit

peut-être mettre en cause un ensemble de facteurs. On peut en effet penser que le mauvais état de certains arbres peut tenir à un état physiologique déficient lié ou non au sol et conjugué avec une attaque pathogène. Il est très difficile dans ces conditions d'isoler les causes réelles et de dire dans quelle mesure elles influent sur le mauvais état de l'arbre. Le terme « plomb » par exemple désigne

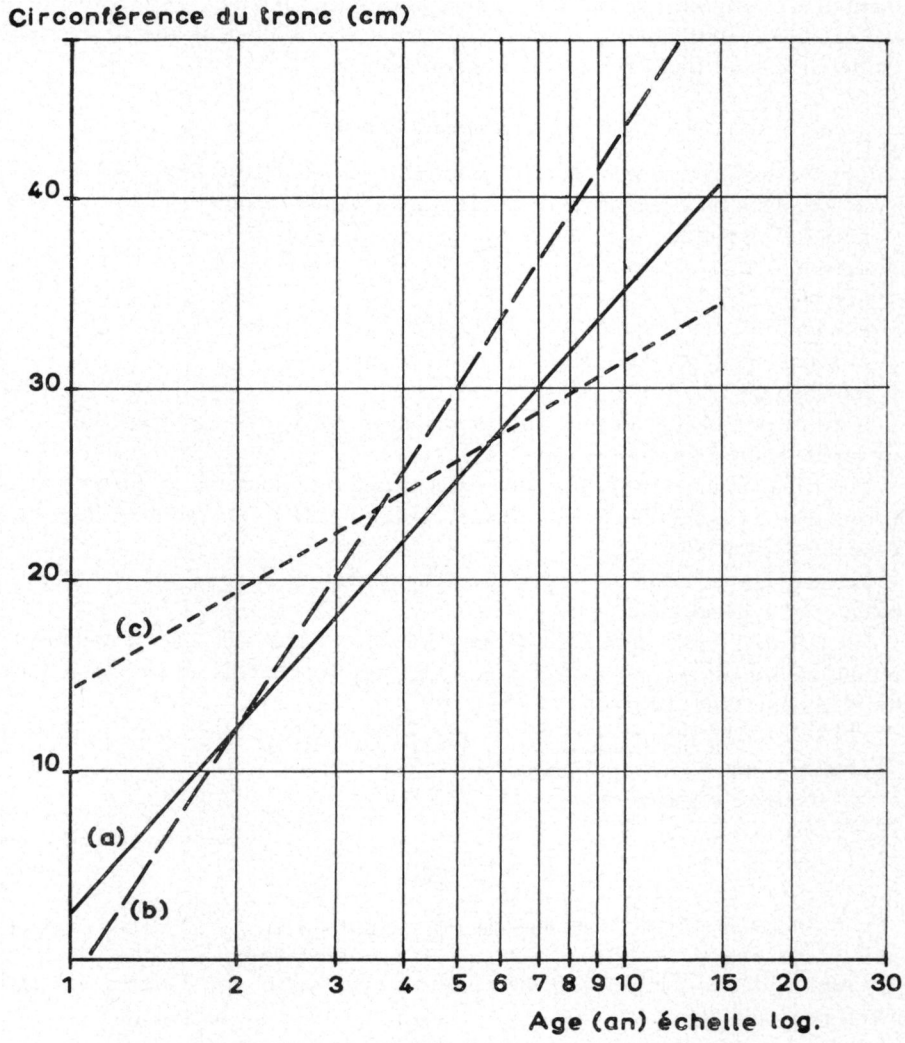


FIG. 2. — *Comparaison des courbes de croissance du tronc*
Comparaison possible pour les droites a *et* b *seulement.*

un ensemble de symptômes qui peuvent provenir entre autres, d'une asphyxie des racines ou d'une attaque parasitaire (GROSCLAUDE C., 1960).

Si l'emploi conjugué de l'examen du profil cultural et des techniques statistiques permet de mettre en évidence certaines actions du sol, il ne faut pas se dissimuler que des connaissances supplémentaires de physiologie, notamment de physiologie des racines seraient nécessaires pour une interprétation plus approfondie.

III. — LA TEXTURE

C'est l'ensemble des propriétés résultant directement de la taille des particules élémentaires constituant le sol. Elle va nous fournir un premier critère de distinction des sols. Après avoir défini les textures des divers sols nous allons étudier le comportement des arbres sur les catégories de sol ainsi définies.

1° *Définition des textures*

Les sols sableux comportent un pourcentage important de sables grossiers, comme le montre cet exemple (pourcentage de fractions en poids).

matière organique	=	1,65
0-2 μ (1)	=	7,95
2-20 μ	=	16,90
20-50 μ	=	10,40
50-200 μ	=	18,50
200-2000 μ	=	44,60

Souvent ces sols deviennent plus lourds en profondeur, le pourcentage d'argile, pouvant atteindre 24 p. 100.

Très fréquemment, ces sols sont extrêmement caillouteux et présentent des pourcentages en poids élevés de cailloux, de l'ordre de 60 p. 100 avec des valeurs maxima dépassant 80 p. 100.

Les teneurs en matière organique s'échelonnent de 0,45 p. 100 à 1,75 p. 100 pour la couche de surface.

Du fait de l'importance des éléments colloïdaux dans des sols où dominent les fractions sableuses nous avons distingué les sols sableux à plus de 10 p. 100 d'argile et ceux à moins de 10 p. 100.

Les sols limoneux sont caractérisés par un pourcentage dominant de particules de diamètre compris entre 2 et 50 μ. En voici un exemple :

matière organique	=	1,75
0-2 μ	=	15,45
2-20 μ	=	17,35
20-50 μ	=	45,35
50-200 μ	=	15,90
200-2000 μ	=	4,20

Certains de ces sols peuvent être assez argileux (27 p. 100 d'argile). Ils sont en général peu caillouteux.

Le pourcentage de matière organique va de 0,75 à 2,40 p. 100 en surface.

D'une façon générale nous définirons un sol par la texture de l'horizon le plus épais de la partie du profil exploité par les racines.

2° *Rôle des cailloux*

Les sols sableux à plus de 10 p. 100 d'argile comportent de grosses quantités de cailloux ; nous avons essayé de voir si la présence de cailloux influait sur la vigueur

(1) μ = 1/1000 de mm.

de l'arbre. Pour cela nous avons comparé les rythmes de croissance des arbres poussant sur sol avec ou sans cailloux. Les droites de régression (fig. 3) se coupent pour

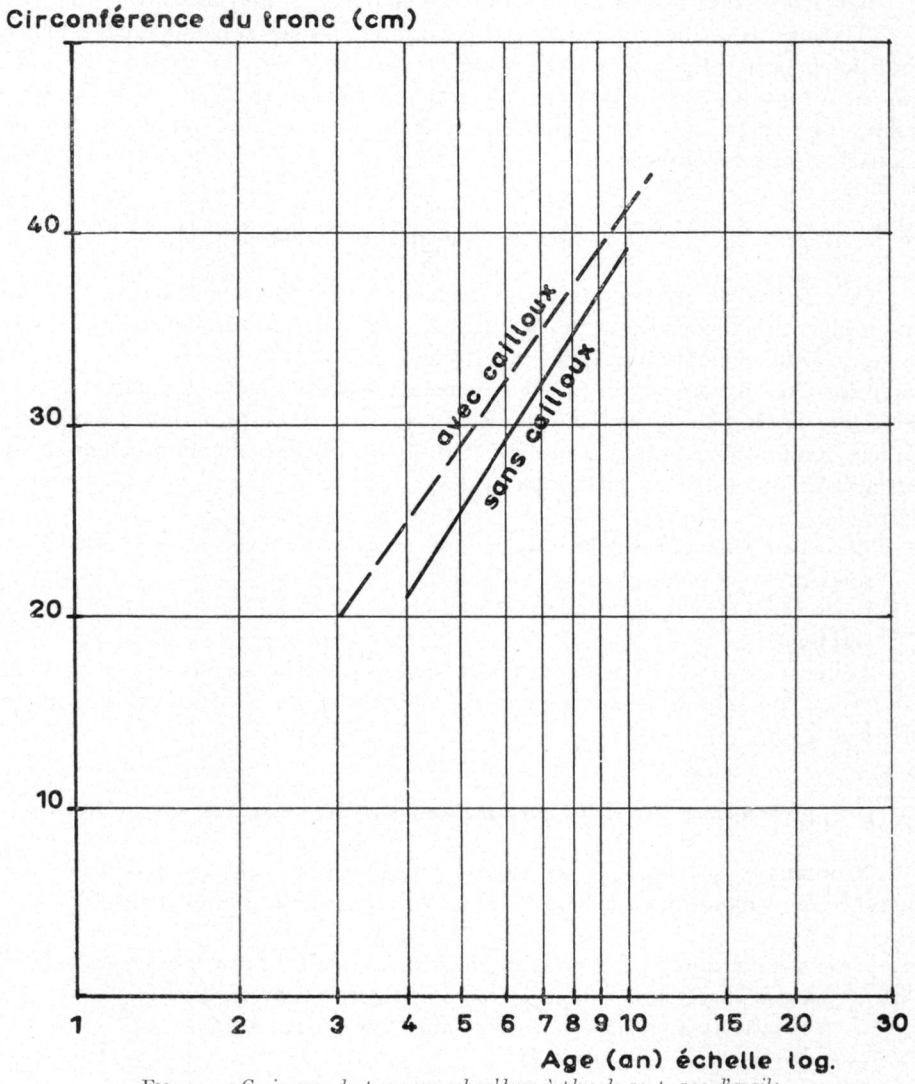


FIG. 3. — *Croissance du tronc sur sol sableux à plus de* 10 *p.* 100 *d'argile, caillouteux et non caillouteux*

	coefficient de regression y log x_1	fréquence
avec cailloux	41,28*** (1)	27
sans cailloux	45,24***	21

(1) On adopte la convention suivante :
* significatif au seuil 0,05
** » » 0,01
*** » » 0,001.

$x_1 = 20$ ans et ont des pentes (coefficient de régression) non significativement différentes (seuil 0,80).

Par ailleurs les ordonnées moyennes ne sont pas significativement différentes.

Il est vraisemblable d'admettre que ces droites ne sont pas confondues seulement pour des raisons aléatoires. *Ainsi dans le cas des sols étudiés, la présence de cailloux n'a pas d'influence défavorable sur la végétation.* Nous verrons par la suite que les caillous ne sont pas inertes au point de vue de la rétention de l'eau et peuvent avoir d'autres actions favorables.

3° *Texture et profondeurs d'enracinement*

On a essayé de vérifier que les profondeurs d'enracinement notées sur les parois du profil cultural dépendaient des textures. La profondeur d'enracinement est définie comme l'épaisseur de sol renfermant la totalité de l'enracinement. C'est la distance comprise entre la surface du sol et la racine de 1 mm au moins de diamètre la plus profonde. Du fait de la dissymétrie de l'enracinement, cette mesure ne représente qu'une évalutation approximative de la profondeur réelle d'enracinement. Notons par ailleurs qu'on n'a pu mettre en évidence l'existence de pivots sous le collet de l'arbre.

Les valeurs moyennes des profondeurs d'enracinement sont les suivantes :

sols sableux à moins de 10 p. 100 d'argile = 57,5 cm
sols sableux à plus de 10 p. 100 d'argile = 58,5 cm
sols limoneux = 51,5 cm

Les profondeurs d'enracinement sont analogues sur les divers sols en particulier pour ceux qui sont sableux. Aucune des différences n'est significative à un seuil inférieur à 0,10.

4° *Influence des différentes textures sur la croissance des arbres*

Maintenant que nous avons montré l'indépendance de la croissance et de la présence de cailloux, nous allons étudier l'influence de la granulométrie de la terre fine.

Trois populations d'arbres ont été constituées poussant respectivement sur :

— sols sableux à moins de 10 p. 100 d'argile (fréquence 11) ;
— sols sableux à plus de 10 p. 100 d'argile (fréquence 54) ;
— sols limoneux (fréquence 41).

Les équations de régression des droites représentées sur le graphique n° 4 sont :

sols sableux à moins de 10 p. 100 d'argile

$$y = 15{,}41 \log x_1 \; 15{,}26$$

sols sableux à plus de 10 p. 100 d'argile

$$y = 38{,}53 \log x_1 + 1{,}00$$

sols limoneux

$$y = 15{,}89 \log x_1 + 16{,}42$$

Ces droites se coupent pour des âges de plantation compris entre 0 et 5 ans. Il est possible de comparer les valeurs de leurs coefficients angulaires b qui sont caractéristiques de la croissance sur chaque sol.

	coefficient de regression y-log x_1	fréquence
sols sableux à moins de 10% d'argile	15,41 (1)	11
sols sableux à plus de 10% d'argile	38,53***	54
sols limoneux	15,89*	41

(1) Significatif au seuil 0,13 seulement.

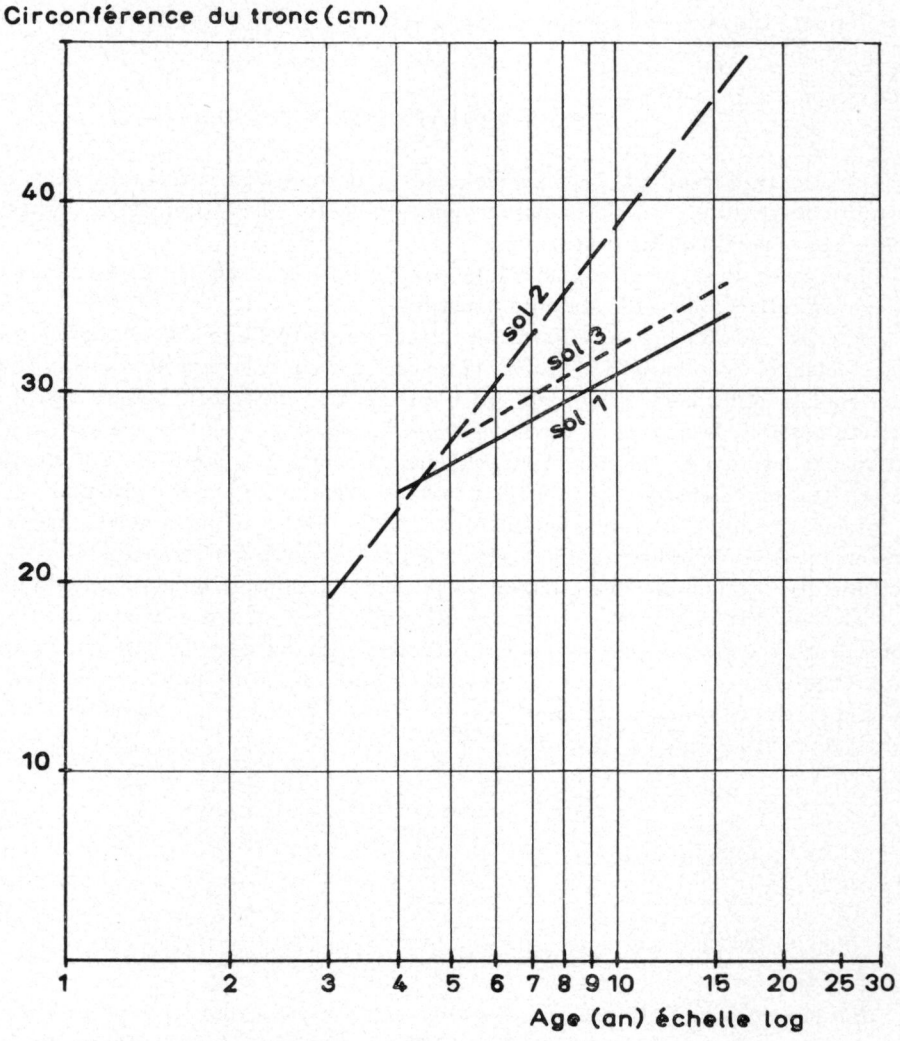


FIG. 4. — *Comparaison de la croissance du tronc de Pêchers poussant sur différents sols.*
1° sols sableux à moins de 10 p. 100 d'argile ;
2° sols sableux à plus de 10 p. 100 d'argile ;
3° sols limoneux.

Les coefficients *b* sont significativement différents pour les sols sableux à plus de 10 p. 100 d'argile et les sols sableux à moins de 10 p. 100 d'argile (seuil 0,05). Il en est de même pour les sols sableux à 10 p. 100 d'argile et les sols limoneux (seuil 0,01).

Les catégories de sols ne semblent pas avoir d'influence nette sur l'installation des racines du Pêcher, peut être à cause d'un enracinement superficiel caractéristique de l'espèce. Par contre l'action sur la vigueur apparaît nettement. *Les sols sableux avec une certaine quantité d'argile (au moins 10 p. 100) sont les plus favorables, tandis que les sols sableux très peu argileux et les sols limoneux arrivent en dernière position.* Si de telles différences sont apparues pour des arbres poussant sur des sols de texture différente, elles ne sont pas dues uniquement à la texture, mais à l'ensemble des propriétés rattachées à chaque groupe de sol.

IV. — LES PROPRIÉTÉS STRUCTURALES

La structure résulte de l'arrangement des particules élémentaires étudiées dans la rubrique texture. Ces particules agglomérées entre elles forment des agrégats dont l'agencement constitue la structure.

Les agrégats peuvent être détruits par l'action de l'eau et la résistance des agrégats à cette action est la stabilité structurale.

Les sols sableux ont en général une structure particulaire plus ou moins cohérente, cette cohésion variant à sec avec la teneur en argile. Certains de ces sols présentent une structure continue fragile qui n'est pas très favorable. Malgré cela il n'a pas été possible de mettre en évidence des différences du point de vue de l'exploitation par les racines. La présence de cailloux ne semble pas modifier la profondeur de pénétration des racines quoiqu'elle leur fasse prendre un trajet tortueux.

Leur stabilité structurale mesurée par l'indice log 10 K qui convient mieux au classement des sols sableux varient entre 0,83 et 2,49 avec une moyenne de 1,55 (1). Certains de ces indices sont assez faibles, ce qui dénote des propriétés assez défavorables.

Les sols limoneux présentent pour la plupart une structure continue et sont normalement exploités par les racines. Certains sont battant en surface et, après les précipitations, la surface du sol prend un aspect glacé qui limite l'infiltration de l'eau et provoque son accumulation dans les zones déprimées. Les stabilités structurales prennent les valeurs suivantes :

	log 10 S	log 10 K
minimum	0,98	1,12
maximum.....	2,58	2,00
moyenne	1,77	1,49

La structure conditionne la porosité et, par voie de conséquence, l'aération du sol. Lorsque les phénomènes d'asphyxie sont caractérisés, on en distingue toujours

(1) Il convient de remarquer que la stabilité croît dans le même sens que log 10 K et en sens inverse de log 10 S.

les traces sous forme de taches de rouille ou de concrétions ferrugineuses. Presque tous les sols examinés étaient sains, sauf un sol limoneux comportant, à partir de 40 cm de profondeur un horizon très hydromorphe avec taches rouille et concrétions en voie de durcissement. Les pêchers, des *Amsden* sur franc, ont vu leur rythme de croissance brusquement ralenti vers la 7e année, certainement lorsque les racines ont essayé d'exploiter la zone hydromorphe. De nombreuses radicelles mortes sont visi-

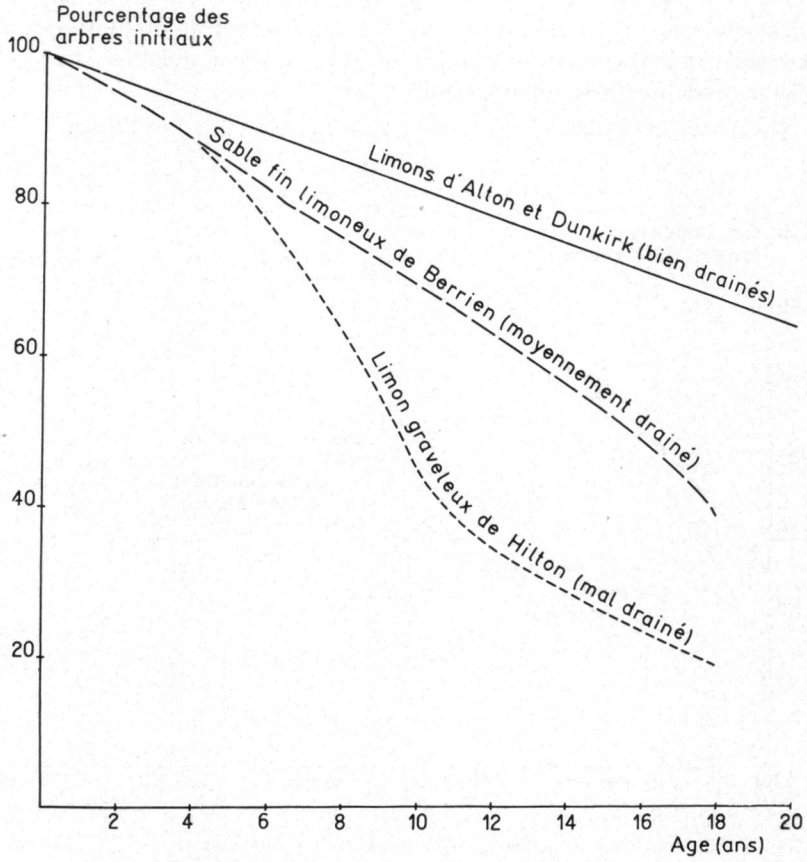


FIG. 5. — *Longévité des pêchers sur des sols à drainage différents dans l'état de New York (d'après H. F. de Graff)*

bles dans cet horizon. La moyenne générale des longueurs de la circonférence du franc était à 12 ans inférieure de 6 cm à la moyenne.

Cette observation est particulièrement typique, mais il existe des cas beaucoup moins nets où un drainage déficient moins prononcé peut avoir une action sur la vigueur de l'arbre et le rendement. Signalons à cet égard les travaux de H. F. de GRAFF (1939) sur le Pêcher dans l'état de New York. *Pour 3 groupes de sols mal drainés, moyennement drainés et bien drainés les rendements moyens par arbre sont respectivement de* 0,68, 0,86 et 1,13 *bushels. La longévité des arbres est également réduite comme*

le montre le graphique 5. Par ailleurs la production maxima est atteinte beaucoup plus rapidement et décroît beaucoup plus tôt pour les vergers mal drainés (fig.6).

Les propriétés structurales interviennent également dans la résistance à l'asphyxie des racines lors d'années particulièrement humides. Voici à ce sujet les quelques remarques faites dans la Vallée du Rhône à la suite des hivers 1960-61. Les causes de l'asphyxie sont multiples et les variétés de Pêchers, les porte-greffes, les variations locales de la pluviométrie, la pente et le mode d'entretien du sol ont dû jouer un rôle important. Ceci pourrait expliquer que dans des conditions sensiblement identiques au point de vue sol, des accidents se soient produits sur certains vergers seulement. Cependant un examen des sols, où les accidents se sont produits fait apparaître les quelques faits suivants :

— pas d'accidents sur les sols sableux à moins de 10 p. 100 d'argile.

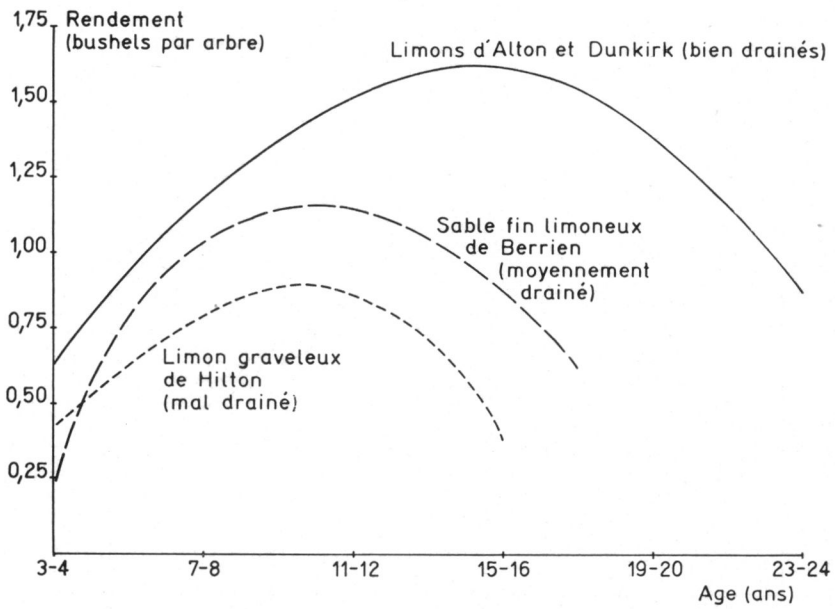


FIG. 6. — *Evolution du rendement des pêchers en fonction de l'âge sur des sols à drainages différents (d'après H. F. de Graff)*

— quelques accidents sur sols sablo-argileux. On a vu que ces sols présentaient des propriétés structurales marginales en rapport avec la constitution de leurs fractions granulométriques fines.

— accidents relativement plus nombreux et plus graves sur sols limoneux sur lesquels dans la plupart des cas les croissances des arbres étaient auparavant normales.

— si l'on considère les indices de stabilité structurale, on constate que la majorité des accidents se sont produits sur des sols possédant au moins un horizon à indice médiocre. Pour les sols sablo-argileux, l'indice log 10 K qui convient mieux à leur

classement a en général des valeurs inférieures à 1,5. Pour les sols limoneux les indices les plus mauvais de chaque profil s'échelonnent pour log 10 S entre 1,53 et 2,23 et pour log 10 K entre 1,12 et 1,53.

Il semblerait donc que, pour que des accidents d'asphyxie se produisent, il faut que l'un des horizons du sol soit dans une catégorie médiocre au point de vue propriétées structurales, mais cette condition-là n'est, heureusement, pas suffisante.

On peut rapprocher de ceci les différences de comportement signalées par TELLIEZ (1952) entre les sols de boulbène et terrefort dans le Sud-Ouest, lors de l'excès d'eau de l'hiver 1950-51. (tableau 1). La boulbène est un sol de texture limoneuse (16 à 24 p. 100 d'argile — 17 à 35 p. 100 de limon 2-20 μ), tandis que le terrefort est beaucoup plus riche en argile (43 à 55 p. 100).

TABLEAU 1

Pourcentage d'arbres morts dans le Sud-Ouest en 1951

Sols → / Département ↓	Terrefort		Boulbène	
Lot-et-Garonne	plateau coteau	15 à 50 5 à 20	plaine plateau	10 à 90 25 à 60
Tarn-et-Garonne	plateau coteau	10 à 30 5 à 15	plaine plateau	25 à 90 20 à 50

On constate que les Pêchers sur boulbène sont beaucoup plus touchés que les Pêchers sur terrefort. Ainsi certains sols argileux paraissent moins dangereux que les limons, lors d'années très humides.

A la différence de ce qui s'est passé pour le Pommier dans la Sarthe (GRAS R., 1961), il n'a pas été possible de mettre en évidence une relation nette entre les indices de stabilité structurale et l'exploitation par les racines des divers horizons. Pour un groupe de 13 sols sableux, on a pu montrer une influence de l'indice de stabilité structurale log 10 K sur la vigueur de l'arbre mesurée par la circonférence du tronc. On a considéré l'indice moyen arithmétique des horizons exploités par les racines, ce qui revient à prendre les moyennes des valeurs des horizons les plus superficiels. Il existe une régression double significative (point 1 p. 100) entre :

y = circonférence du tronc (cm) ;

x_1 = âge (an) ;

log 10 K = indice de stabilité structurale (percolation)

$$y = 55{,}24 \log x_1 + 5{,}09 \log 10\ K - 22{,}64.$$

La régression de y en log 10 K, après ajustement de log x_1 est significative au point 1 p. 100. Ainsi en sol sableux, la croissance est d'autant meilleure que l'indice log 10 K moyen est plus élevé.

Les propriétés structurales peuvent intervenir de deux façons différentes sur la croissance du Pêcher. Elles peuvent soit interdire ou limiter l'exploitation de certains horizons, soit contrarier le fonctionnement normal des racines, ce qui se traduit par une nutrition moins efficace que la normale et une diminution de vigueur

et de production. Quoiqu'il soit très difficile de mettre en évidence des actions du deuxième type, il semble cependant que les sols à faible porosité (limons par exemple) portent des Pêchers sur franc de vigueur et de longévité inférieure à la normale. Ces plantations seraient également beaucoup plus sensibles aux accidents dus à l'excès d'eau.

V. — RÔLE DU SOL AU POINT DE VUE DE L'ALIMENTATION EN EAU

L'alimentation en eau du végétal s'effectue par l'intermédiaire du sol. Schématiquement, on peut considérer celui-ci comme un support permettant la rétention de l'eau des précipitations atmosphériques et sa fourniture aux arbres par l'intermédiaire des racines. Pendant une période dépourvue de précipitations, l'alimentation du végétal s'effectue aux dépens des réserves en eau du sol.

L'alimentation en eau sera optimum si le végétal fonctionne en régime d'évapotranspiration potentielle, c'est-à-dire évapotranspiration d'une surface bien couverte par la végétation sur un sol bien alimenté en eau. Ces conditions seront réalisées si le sol est à même de fournir les quantités d'eau nécessaires. Ces quantités sont représentées par la différence entre la pluviométrie et l'évapotranspiration potentielle. Comme cette dernière dépend en première analyse des conditions climatiques, il est nécessaire d'étudier l'ensemble des relations sol-climat-arbre.

1° *Les capacités de réserve en eau du sol*

Du fait de la lenteur de la circulation de l'eau dans le sol aux faibles humidités, c'est à peu près exclusivement l'épaisseur de sol exploitée par les racines qui fournit l'eau au végétal.

A épaisseur exploitée égale, la quantité d'eau disponible dépend des caractéritisques propres du sol. La quantité d'eau utile est en première approximation la différence entre la capacité au champ et le point de flétrissement.

Par ailleurs, si l'on désire exprimer les réserves en eau en mm de hauteurs d'eau, ce qui est fort utile pour la comparaison avec la pluviométrie et l'évapotranspiration, on doit faire intervenir la densité apparente du sol en place. Finalement dans un *sol homogène* la capacité de réserve en eau du sol se calcule ainsi :

R = capacité de réserve en eau, en mm de hauteur d'eau ;
d = densité apparente ;
c = capacité au champ en pourcentage de poids sec ;
f = point de flétrissement en pourcentage de poids sec ;
h = profondeur d'enracinement (dm) ;

$$R = hd\,(c-f)\ ;$$

S'il y a plusieurs horizons la réserve devient :

$$R = \Sigma\, hd\,(c-f).$$

Nous verrons que la présence dans de nombreux sols de grandes quantités de cailloux et le fait que certains de ces cailloux retiennent de l'eau, ont conduit à modifier cette formule.

Il importe de garder présent à l'esprit que les réserves en eau ainsi définies ne représentent qu'une *valeur plafond*. En effet toute l'eau de ces réserves ne peut être utilisée intégralement lorsque l'évapotranspiration est trop intense (HALLAIRE M., 1960). Une telle évapotranspiration requiert une circulation rapide de l'eau dans le sol et il y a rupture des films d'eau ; l'alimentation en eau du végétal par le sol devient négligeable avant que toute l'eau utile ait pu être réellement utilisée. Ainsi les valeurs des réserves en eau qui vont être calculées doivent seulement être considérées comme des *limites supérieures*. Il n'en demeure pas moins vrai que les quantités d'eau réellement utilisées dans des conditions climatiques données seront d'autant plus grandes que les valeurs plafonds seront plus élevées.

A. — *Profondeur d'enracinement* :

La détermination de cette profondeur se fait sur les tranchées creusées pour l'examen du profil cultural. La profondeur est celle définie au chapitre texture. Les profondeurs ainsi notées s'échelonnent entre 30 et 80 cm avec une valeur moyenne de l'ordre de 55.

L'importance de la profondeur d'enracinement a pu être mise en évidence par une méthode statistique en calculant pour 33 pêchers greffés sur franc une régression double entre :

y = longueur de la circonférence du tronc (cm) ;

x_1 = âge de plantation ;

x_2 = profondeur d'enracinement.

Après transformation des variables x_1 et x_2 , on obtient l'équation suivante :

$$y = 30{,}23 \log x_1 - 1067{,}87 \frac{1}{x_2} + 25{,}58.$$

L'analyse de la variance montre que la régression double est significative au point 0,1 p. 100. Il est surtout important de noter que la régression de y en x_2 (profondeur d'enracinement) est significative au point 0,1 p. 100, après ajustement de la variable x_1.

Ainsi la circonférence du tronc, qui est une mesure de la vigueur de l'arbre croît avec l'âge de plantation, mais d'autant plus que l'enracinement est plus profond.

B. — *Caractéristiques hydriques du sol* :

Dans beaucoup de cas, les sols n'étant pas homogènes du fait de la présence de cailloux, nous avons dû considérer 2 fractions : la terre fine passant à travers un tamis de 2 mm et les cailloux de diamètre supérieur.

a) *Terre fine.* — L'eau utile d'un sol est l'intervalle d'humidité compris entre la capacité au champ et le point de flétrissement.

La capacité au champ est l'humidité restant dans un sol qui, après saturation, s'est ressuyé librement par gravité. C'est une caractéristique du sol en place que l'on peut approximativement déterminer au laboratoire, en soumettant le sol préalablement humecté à un ressuyage sous une énergie donnée. Cette énergie varie avec la texture du sol et est d'autant plus faible que le sol a une texture plus sableuse (ALWAY et MC DOLE, 1917 ; RICHARDS et WEAVER, 1944 ; MARSHALL, 1945). Comme les sols, objets de la présente étude, sont de texture sableuse et limoneuse, l'utilisation d'une énergie (ici une pression) unique introduit des erreurs considérables. On a alors essayé d'améliorer la valeur des mesures en déterminant empiriquement à quelle

pression il fallait ressuyer chaque sol au laboratoire pour obtenir l'humidité à la capacité au champ.

Pour cela on a construit, pour des sols de capacité au champ connue, les courbes pF (1)-humidité de la terre tamisée à 2 mm. On détermine, par l'utilisation de ces courbes (fig. 7), le pF de ressuyage à la capacité au champ. On porte alors sur un graphique le pF de ressuyage à la capacité au champ et l'humidité du sol à pF 3 (fig 8) et la droite de régression correspondante (significative au seuil 1 p. 100).

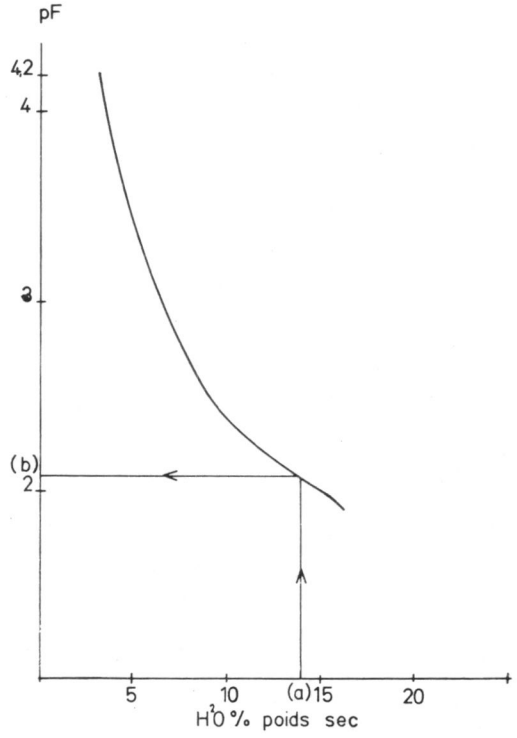


FIG. 7. — *Utilisation de la courbe de pF de la terre fine, pour déterminer le pF de ressuyage correspondant à la capacité au champ.*
a — humidité du sol en place à la capacité au champ.
b — pF de ressuyage de la terre fine correspondant à la capacité au champ.

On peut alors pour un sol quelconque, après mesure de son humidité à pF 3, déterminer le pF auquel il doit être ressuyé pour obtenir une humidité correspondante à la capacité au champ. Ce procédé ne tient pas compte de la totalité des facteurs influant sur la capacité au champ : interaction entre horizons, propriétés structurales (FEODOROFF A., 1961), mais il permet de rapprocher les valeurs mesurées au laboratoire des vraies valeurs existant au champ.

Nous avons ainsi ressuyé chaque sol à une pression fonction de son humidité à pF 3.

Le point de flétrissement a été mesuré par ressuyage du sol préalablement imbibé, sous une pression de 16 kg/cm² (pF 4,20).

(1) Le pF est le logarithme décimal de la différence d'énergie libre entre l'eau libre et liée. C'est ici le logarithme de la pression de ressuyage exprimée en g/cm².

Si l'on considère la différence entre la capacité au champ et le point de flétrissement on constate que pour certains sables grossiers elle est de l'ordre de 6, pour les sols légèrement argileux de l'ordre de 8-12 et pour les limons de l'ordre de 15.

Le tableau 2 donne quelques caractéristiques hydriques de sols typiques.

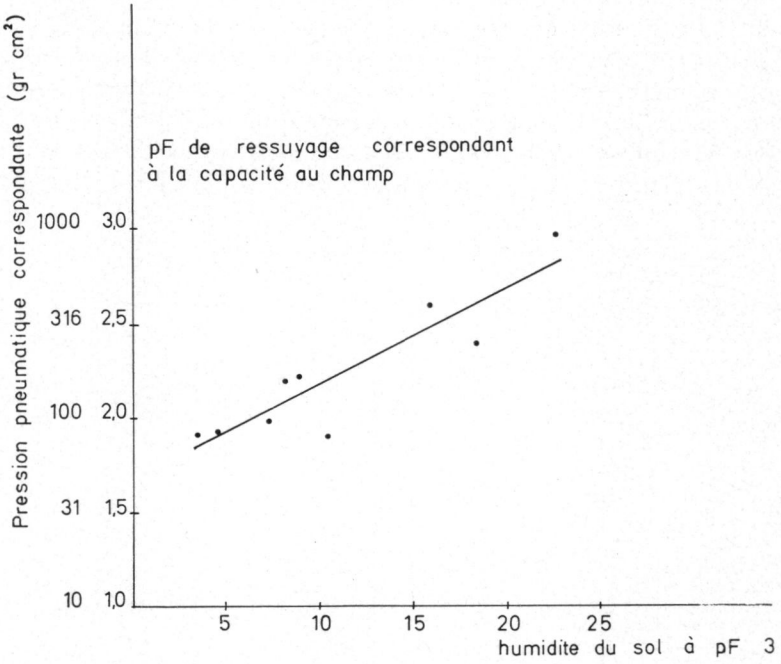


FIG. 8. — *Relation entre le pF de ressuyage correspondant à la capacité au champ et l'humidité de la terre à pF 3*

TABLEAU 2

Caractéristiques hydriques des sols typiques

	humidité à :			Eau utile : capacité au champ-eau à pF 4,2
	pF 4,2	pF 3	capacité au champ	
sable à moins de 10 % argile	3,0	4,60	8,70	5,7
sable à plus de 10 % argile	3,3	6,4	12,0	8,7
Limon	6,8	15,2	21,4	14,6

L'histogramme de répartition des fréquences en fonction du pourcentage d'eau utile tracé pour l'ensemble des horizons a une forme en cloche (fig. 9). Si l'ensemble des valeurs se situent entre 4 et 20 p. 100 d'eau utile, 80 p. 100 des échantillons se situent entre 8 et 16 p. 100 et 65 p. 100 entre 9 et 15 p. 100 d'eau utile.

b) *Cailloux.* — Les cailloux poreux peuvent retenir un certain volume d'eau

(COILE T. S., 1953). Or les éléments grossiers des sols étudiés comportent, à côté de silex et de roches éruptives peu altérées, des quantités importantes de grès. Ces derniers matériaux, qui ont une densité apparente assez faible (entre 2 et 1,3), possèdent une porosité élevée. La rétention en eau totale varie entre 8 et 42 p. 100 du poids sec.

L'intérieur du caillou n'est pas, sauf cas particulier rare, accessible aux poils absorbants. Donc l'eau contenue par les éléments grossiers ne sera utilisable par l'arbre que si elle peut être extraite par la succion du sol adjacent, ou les racines pourront l'absorber. On est alors amené à penser que la quantité d'eau utilisable fournie par un caillou dépend, outre les caractéristiques de la roche, des propriétés de la terre fine, qui est à son contact (GRAS R., et MONNIER G., 1962). Il faut donc déterminer la quantité d'eau retenue par le cailloux, en équilibre hydrique avec le sol

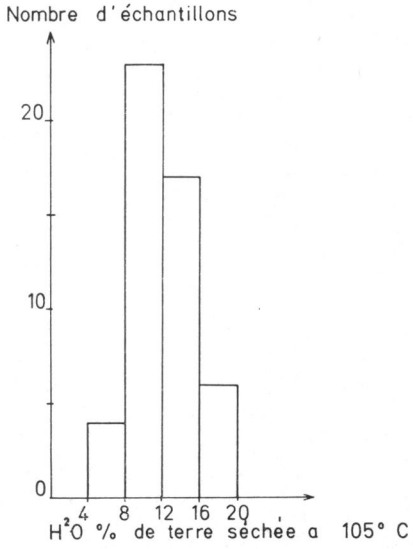


FIG. 9. — *Diagramme des fréquences d'eau utile*

à la capacité au champ et au point de flétrissement. Pour cela les cailloux humectés et enrobés de sol humide sont placés dans un appareil à pression pneumatique ; après ressuyage du sol à la capacité au champ et au point de flétrissement on mesure l'humidité du caillou. Avec un sol sableux typique de la région étudiée, on obtient les résultats suivants rassemblés dans le tableau 3.

Les pourcentages d'eau utile sont importants et les cailloux peuvent contribuer pour une part notable à l'alimentation en eau des arbres.

Les catégories de pierres sont très nombreuses et il n'est pas possible de faire les mesures pour chaque caillou. Aussi avons-nous procédé à une évaluation approximative de la capacité en eau utile des matériaux grossiers. Pour les cailloux poreux, la moyenne des mesures donne la valeur de 21,2 p. 100 du poids sec et pour les éléments peu poreux la valeur 1,7. Par triage à la main, on a déterminé les pourcentages pondéraux respectifs des cailloux poreux (grès) et des cailloux peu poreux (silex, granite). Pour 100 g de cailloux secs, on a 35 g de grès et 65 g de silex et granite. 100 g de cailloux fournissent en moyenne 8,5 g d'eau utile.

TABLEAU 3

Caractéristiques hydriques des cailloux placés dans un sol sableux

	H_2O g pour 100 g de cailloux secs.			
	Capacité totale	à équilibre avec sol sableux		eau utile
		au point de flétrissement	à la capacité au champ	
Grès	40,7	1,2	28,6	27,3
Grès	24,6	1,1	21,0	21,0
Grès	8,5	1,0	7,9	6,9
Granite	2,0	0,3	1,3	1,0

On peut comparer cette valeur avec celle provenant d'une autre évaluation. On a vu que la croissance était analogue que le sol soit caillouteux ou non. On peut théoriquement admettre que la présence de cailloux ne modifie pas les réserves en eau du sol. Pour que ceci soit réalisé, il faut que le même volume apparent de terre fine ou de cailloux fournisse une quantité d'eau utile identique. Écrivons l'égalité entre la quantité d'eau utile fournie par 1 dm^3 de cailloux et 1 dm^3 de terre. En posant :

a = densité apparente de la terre fine ;

b = densité apparente du caillou ;

x = teneur en eau utile du caillou (pourcentage du poids sec) ;

v = teneur en eau utile de la terre fine (pourcentage du poids sec) ;

on a $av = bx$ $\qquad x = a/b.\ v$ (1).

La densité apparente des cailloux étant de l'ordre de 2, celle de la terre fine de 1,6 et la teneur en eau utile des sols sableux 10,6, on obtient $x = 8{,}9$. On voit que ce nombre est du même ordre de grandeur que celui obtenu précédemment. Dorénavant nous utiliserons le chiffre 8,5 comme évaluation de la teneur en eau utile moyenne de l'ensemble des cailloux.

Il est intéressant de noter par ailleurs que, théoriquement, la teneur en eau utile de l'unité de volume de sol en place reste inchangée lorsqu'on remplace volume à volume de la terre fine par des cailloux dont l'eau utile est reliée à celle de la terre fine par la relation 1.

c) *Densité apparente.* — La présence de cailloux diminue la quantité de terre fine contenue dans l'unité de volume de sol en place. Comme cailloux et terre fine ont des caractéristiques hydriques différentes, on est amené à considérer, au lieu de la densité apparente globale, deux densités apparentes : la densité apparente partielle de la terre fine et la densité apparente partielle des cailloux.

La densité apparente partielle d_1 (Bourrier J., 1959) de la terre fine est le poids de terre fine contenue dans l'unité de volume de sol en place. Elle s'obtient en prélevant un échantillon important de sol et en déterminant :

m = masse des cailloux ;

M = masse de terre fine.

En posant : a : densité apparente moyenne de la terre fine ;

b : densité moyenne des cailloux.

le volume du prélèvement est $V = M/a + m/b$; la densité apparente partielle de terre fine est alors :

$$d_1 = \frac{M}{V} = \frac{M}{M/a + m/b}.$$

Nous avons pris pour a la valeur 1,6 et pour b la valeur 2, moyennes d'un ensemble de déterminations.

Pour les sols contenant des cailloux nous avons trouvé des valeurs de d_1 variant entre 0,19 et 1,29, avec une valeur moyenne de 0,76.

La densité apparente partielle de cailloux d_2, poids de cailloux contenus dans l'unité de volume de sol en place est $d_2 = m/V$, avec les notations utilisées précédemment. Ces valeurs varient entre 0,57 et 1,75 et ont une moyenne de 0,99.

d) *Valeurs des réserves en eau.* — Dans le cas général, la valeur de la capacité

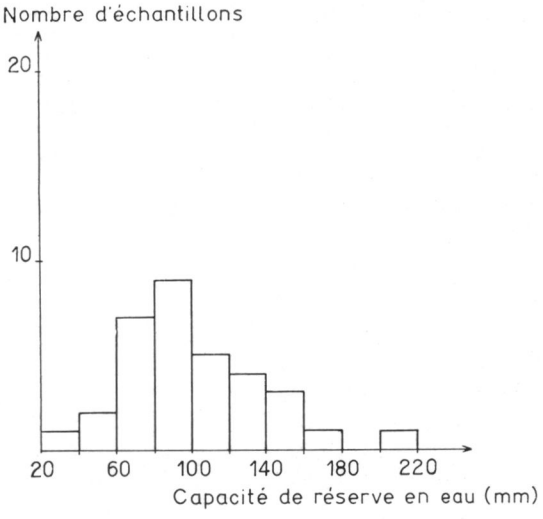


FIG. 10. — *Diagramme des fréquences des capacités de réserve en eau, calculées pour la profondeur de sol exploitée*

de réserve en eau du sol est la somme de la réserve provenant de la terre fine et des cailloux.

Si : d_1 densité apparente partielle
c_1 capacité au champ
f_1 point de flétrissement
} de la terre fine

d_2 densité apparente partielle
c_2 humidité à l'équilibre avec le sol à la capacité au champ
f_2 humidité à l'équilibre avec le sol au point de flétrissement
} pour les cailloux

la valeur de la capacité de réserve R en mm est :

$$R = h\,[(d_1\,(c_1 - f_1) + d_2\,(c_2 - f_2))$$

Les valeurs des capacités de réserve en eau utile s'échelonnent entre 24 et 203 mm avec une valeur moyenne de 100,4 mm.

L'examen de l'histogramme de la fig. 10 montre que 63,6 p. 100 des mesures sont entre 60 et 120 mm.

Pour les sols ne contenant pas de caillou on peut distinguer les catégories suivantes :

— sols sableux à moins de 10 *p.* 100 d'argile = 25 à 60 mm

— sols sableux à plus de 10 *p.* 100 d'argile = de 50 à 130, Moyenne 88,3

— sols limoneux entre 75 et 200 mm avec une moyenne de 128,2 mm.

Lorsqu'il y a des cailloux dans le sol, leur contribution est importante et peut aller de 18 à 88 mm. Ceci rend plus compréhensible le comportement des Pêchers sur des sols très caillouteux où leur vigueur n'est pas atténuée.

2. — *Les caractéristiques climatiques*

Le tableau 4 donne pour l'année normale à Valence les valeurs de la pluviométrie, de l'évapotranspiration potentielle calculée par la formule de Turc L. (1961) et du déficit de la pluviométrie sur l'évapotranspiration. Du fait de la rareté des renseignements climatiques, nous avons dû faire le calcul à partir des moyennes mensuelles, au lieu d'utiliser chaque valeur mensuelle et de prendre la moyenne des résultats obtenus. L'utilisation des moyennes des précipitations sous-estime la valeur du déficit, car la compensation qui se fait au début et à la fin de la période sèche sur la moyenne des précipitations ne se produit pas dans la réalité d'une année sur l'autre. Ceci nous a conduit à augmenter la valeur annuelle du déficit de 40 mm environ.

TABLEAU 4

Caractéristiques climatiques moyennes à Valence (mm)

Mois	Pluviométrie	Évapotranspiration potentielle *	Déficit mensuel normal	Déficit mensuel corrigé	Déficit cumulé
J....	31	13	0		
F ...	34	25	0	8	8
M ...	74	49,5	0	8	16
A ...	71	84,0	13	21	37
M ...	86	111	25	25	62
J ...	77	134	57	57	119
J ...	43	142	99	99	218
A ...	101	125	24	32	250
S....	105	96	0	12	262
O....	142	52	0		
N ...	85	21,5	0		
D ...	55	14,0	0		
	904			262	262

* Approximations par défaut (effet du vent).

Il y a déficit important de la pluviométrie sur l'évapotranspiration entre avril et août, le déficit annuel normal atteignant 260 mm. Les valeurs mensuelles les plus élevées se situent au mois de juillet : 142 mm.

L'ensemble de la région étudiée se trouve dans une zone où le déficit annuel varie entre 220 et 260 mm. On peut penser que ce déficit est de 230 mm à Vienne et de 255 mm à Romans.

Les valeurs réelles de chaque année peuvent être très différentes comme le montrent les résultats de l'année 1955 à Valence (tableau 5) : cette année là le déficit annuel a atteint 428,4 mm.

TABLEAU 5

Valeurs mensuelles du déficit de la pluviométrie sur l'évapotranspiration potentielle (mm) à Valence en 1955

	Déficit mensuel	Déficit cumulé
J		0
F		0
M	6,8	6,8
A	78	84,8
M	42,2	127,0
J	23,0	150,0
J	113,3	263,3
A	74,1	337,4
S	91,0	428,4
O		
N		
D		

Aussi ne faut-il considérer la valeur moyenne adoptée que comme une approximation qui permet de situer l'ordre de grandeur du déficit dans la région.

3° *L'alimentation en eau du végétal*

On a vu que l'alimentation en eau est satisfaisante si le sol peut fournir la quantité E_p-P, après la reconstitution des réserves en hiver, c'est-à-dire si la valeur des réserves atteint *au moins* cette valeur.

La comparaison de la valeur normale du déficit annuel E_p-P et de la capacité de réserve du sol montre que, dans la majorité des cas, cette capacité est inférieure au déficit. Il s'ensuit que, lorsque les réserves du sol sont épuisées, les arbres restreignent leur consommation en eau. A partir de ce moment-là, la croissance de l'arbre est moindre que l'optimum et le grossissement des fruits est compromis.

La considération du déficit cumulé permet de différencier les variétés précoces et tardives. Pour les variétés précoces, en admettant une réserve moyenne de 100 mm entièrement utilisable, l'alimentation en eau reste normale jusqu'au 1er juillet, c'est-à-dire après la date de maturation des variétés précoces (May Flower, H. Adenot, M. Pouillet).

Par contre au 31 juillet et au 31 août, les différences entre la quantité qui devrait être théoriquement évaporée et la quantité disponible sont respectivement de 118 et 150 mm. L'assimilation chlorophyllienne est diminuée par la fermeture stomatique. On conçoit alors que le manque d'eau se traduise par un calibre plus petit des fruits et que les arboriculteurs se plaignent surtout de la sécheresse pour les variétés tardives.

Ainsi, d'une façon générale, une certaine insuffisance de l'alimentation en eau diminue dans tous les cas la croissance de l'arbre et compromet le grossissement des Pêches de variétés tardives.

Nous allons essayer de montrer l'influence des capacités de réserve en eau sur le volume de l'arbre. Le volume de l'arbre dépend du volume du tronc qui est lui-même proportionnel à la longueur de sa circonférence. Pour cela on a calculé une régression double entre :

d'une part y = longueur de la circonférence du tronc (cm),

d'autre part x_1 = âge de plantation (an) ;

x_3 = capacité de réserve en eau (mm),

sur une population de 33 Pêchers, poussant sur sols avec ou sans cailloux.

Après transformations des variables permettant d'obtenir la variance résiduelle minima on obtient l'équation :

$y = 29{,}90 \log x_1 - 600{,}98\, 1/x_3 + 12{,}27.$

La régression double est significative au seuil 0,1 p. 100 ainsi que la regression de x_3 après ajustement de x_1 (seuil 1 p. 100).

On voit sur l'équation, que pour un âge donné, la longueur de la circonférence du tronc varie hyperboliquement avec la réserve en eau. Ceci implique que la longueur de la circonférence du tronc tende asymptotiquement vers une limite, lorsque la réserve en eau croît indéfiniment. Examinons, pour des arbres de 10 ans, à quelle valeur de la circonférence correspond une valeur des réserves en eau couvrant le déficit de la pluviométrie sur l'évapotranspiration.

L'équation devient $y = 42{,}17 - 600{,}98.\ 1/x_3$.

Si x_3 croît indéfiniment, y tend vers 42,17. Pour $x_3 = 245$ mm qui est la valeur moyenne du déficit correspondant au centre de la zone, y prend la valeur 39,72. Cette valeur ne diffère que de 3,7 p. 100 de la valeur limite :

$$100\frac{\Delta y}{y} = \frac{100(42{,}17 - 39{,}72)}{42{,}17} = 3{,}7 \text{ p. } 100.$$

On voit ainsi que, dans les conditions actuelles de culture, une capacité de réserve en eau de l'ordre de grandeur du déficit de la pluviométrie sur l'évapotranspiration, assurerait une croissance voisine de la limite prévue par l'équation.

On a déjà vu qu'il existait une liaison significative entre la circonférence du tronc et la profondeur d'enracinement. On peut comparer cette équation à l'équation ci-dessus établie, sur la même population d'arbres.

Régression de y en	test F		
	régression double	régression de x_1 après ajustement de x_2 ou x_3	régression de x_2 ou x_3 après ajustement de x_1
x_1 (âge) et x_2 (profondeur d'enracinement)	32,98***	34,9***	30,23***
x_1 (âge) et x_3 (capacité de réserve en eau).....	12,8***	19,6**	10,8**

On constate que la régression la plus étroite est obtenue avec la profondeur d'enracinement (x_2), quoique cette caractéristique soit moins élaborée que la capacité de réserve en eau (x_3).

Ceci peut tenir au mode même de calcul des réserves ou à la forme des équations

de regression. La mise en cause du seul aspect statique de l'alimentation en eau peut également jouer un rôle. Mais la profondeur d'enracinement intervient aussi sur la nutrition : utilisation de l'azote nitrique entraîné par lessivage, par exemple. L'épaisseur de sol exploité par les racines, en liaison simultanée avec la fourniture d'éléments nutritifs et l'alimentation en eau serait alors une caractéristique plus importante pour la vigueur que la seule capacité de réserve en eau.

Le modèle schématique adopté pour l'étude de l'alimentation en eau suppose que toutes les précipitations sont utilisées par l'arbre. En fait il n'en est pas rigoureusement ainsi pour les raisons suivantes :

— les faibles précipitations sont presque immédiatement réévaporées par le soleil sans grand profit pour la plante.

— par ailleurs la profondeur de sol humecté par les mêmes précipitations dépend de la texture. Pour un sol très sableux avec une eau utile de 6 p. 100, une pluie de 1 cm humecte une épaisseur de sol de 11 cm, tandis que pour un limon avec 16 p. 100 d'eau utile l'humectation n'affectera que 4,1 cm. On voit ainsi que, dans le premier cas, l'eau s'infiltre plus profondément et qu'une beaucoup plus grande partie est mise à l'abri de l'évaporation directe par le soleil. Il faut ajouter en outre que pour les limons, leur caractère battant peut ralentir considérablement l'infiltration par la création d'une croûte en surface ou par l'existence de soles de labour. Il arrive alors que l'eau s'accumule en flaque dans les dépressions, en pénétrant très mal à l'intérieur du sol. Ces faits font que les sables sont beaucoup plus aptes à utiliser les petites précipitations estivales.

En conclusion, pour l'année normale il y a un déficit d'eau par rapport à une alimentation optimum compte tenu des réserves emmagasinées pendant l'hiver et des conditions climatiques. Ceci se traduit en général par un volume moindre des arbres, et pour les variétés tardives, par des difficultés de grossissement des fruits.

L'amélioration des capacités de réserve peut se faire par un des procédés suivants :

— *augmentation de la profondeur d'enracinement.* Un accroissement de la profondeur d'enracinement de 10 cm conduit à un supplément des réserves de 18 mm pour une eau utilisable moyenne de 12 p. 100. Lorsque le défoncement a des chances d'être efficace il doit être recommandé, mais il ne faut pas en attendre un comblement de la totalité du déficit. En sol sableux sain l'enfouissement par un labour profond, de fumier ou d'un horizon superficiel riche en matières organiques, est un moyen efficace d'augmenter l'épaisseur de sol exploitée.

— *augmentation de l'intervalle d'eau utile.* On sait que l'incorporation de matière organique élève la capacité au champ, mais cette augmentation n'est pas très élevée et affecte également le point de flétrissement. Il semble qu'une augmentation de l'eau utile de 1 à 2 p. 100 (Salter P. J. et Haworth F., 1961) soit un ordre de grandeur correct. Pour une profondeur exploitée de 50 cm, l'augmentation n'est que de 7 à 15 mm.

On peut également par couverture du sol (mulching) améliorer l'économie de l'eau en réduisant les pertes par évaporation.

Pour les sols limoneux, qui ont tendance à se battre, le maintien d'une surface de sol rugueuse par des façons superficielles, favorise l'infiltration de petites précipitations. L'apport de matières organiques a un effet analogue.

Malheureusement tous ces procédés ne peuvent apporter que des améliorations

assez faibles par rapport à la quantité d'eau qui manque (140 mm au moins ou 1 400 m³/ha) (1). Dans ces conditions des apports d'eau supplémentaires apparaissent comme la solution la plus souhaitable. Dans le cas d'irrigation, il faudra agir avec prudence en n'apportant que les doses nécessaires, tout excès d'eau risquant d'avoir de graves conséquences sur l'état du système radiculaire du Pêcher, particulièrement sensible au manque d'aération.

VI. — IMPORTANCE DES CAILLOUX DANS LE SOL

Nous allons maintenant rassembler l'ensemble des renseignements relatifs aux cailloux.

On a déjà vu que dans les sols sableux à plus de 10 p. 100 d'argile, il n'était pas possible de différencier significativement les rythmes de croissance des arbres en l'absence ou en présence de cailloux. Cependant la droite de régression relative à cette dernière catégorie de sol était placée au-dessus de celle correspondant à l'autre catégorie.

La régression entre la longueur de la circonférence du tronc y, l'âge x_1 et la profondeur d'enracinement x_2 a été calculée sur une population de 33 sols dont 8 étaient caillouteux. La constitution de l'échantillon implique que l'équation de régression soit surtout adaptée aux sols dépourvus de pierre. Si l'on fait l'hypothèse que les cailloux sont un matériau inerte et n'ont aucune action indirecte sur la croissance, on doit s'attendre à ce que l'équation de régression donne pour les cailloux une surestimation systématique, les valeurs calculées devant être toujours supérieures aux valeurs réelles : Une même épaisseur de sol caillouteux serait en effet moins efficace, ce qui reviendrait à abaisser le coefficient de régression de y en x_2 pour l'ensemble des sols caillouteux. En fait la comparaison entre les valeurs calculées par la formule de de régression et les valeurs réelles (fig. 11 haut) montre qu'au contraire les valeurs calculées sont inférieures aux valeurs réelles. Tout se passe comme si, à épaisseur de sol exploitée égale, les sols caillouteux étaient plus efficaces que les sols non caillouteux.

Considérons maintenant pour la même population de sols que précédemment, la régression entre la longueur de la circonférence du tronc y l'âge x_1 et la capacité de réserve en eau x_3, où l'on admet que les cailloux contribuent à la capacité de réserve en eau du sol. On trouve que les valeurs calculées sont également inférieures aux valeurs réelles. (fig. 11 bas).

Les deux dernières constatations ne sont pas strictement indépendantes de la première à savoir qu'à âge égal, les circonférences du tronc sont légèrement plus élevées en sol caillouteux ; on ne peut donc les considérer valablement comme 3 raisons indépendantes militant en faveur d'une même conclusion. Par ailleurs les différences en faveur des sols caillouteux sont assez faibles. Dans ces conditions, s'il est difficile d'affirmer que les sols caillouteux sont plus avantageux, on concluera cependant qu'ils le sont au moins autant. Signalons que certains auteurs : Lutz. J. F. et Chandler R. F. (1946), Larsen J. A. (1930), Pearson G. A. et Marsh R. E. (1935), ont constaté une meilleure croissance des arbres forestiers en sol caillouteux.

Il reste à expliquer l'intervention des cailloux dans la croissance des arbres. On a déjà vu que les pierres jouent un rôle non négligeable dans la rétention de l'eau

(1) Pour une capacité de réserve en eau de 100 mm.

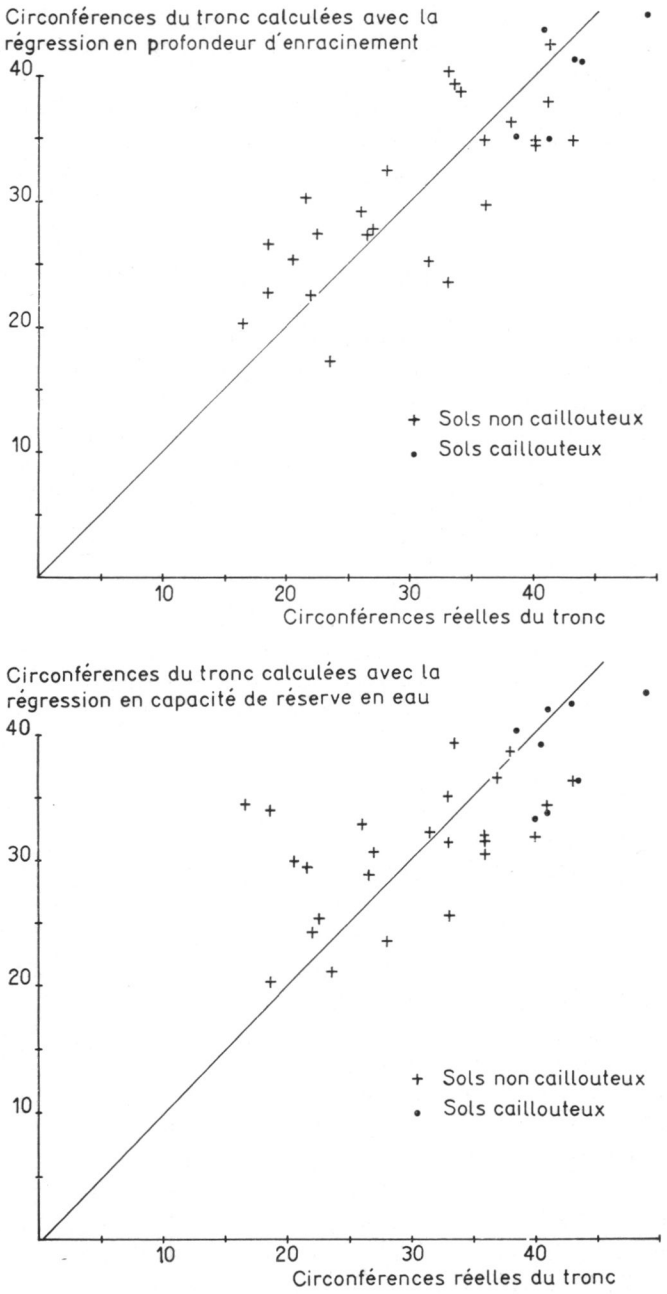


FIG. 11. — *Comparaison entre les valeurs réelles et calculées des circonférences du tronc.*
haut valeurs calculées avec une formule utilisant la profondurr d'enracinement
bas valeurs calculées avec une formule utilisant la capacité de réserve en eau.

du sol puisqu'on a fixé à 8,5 p. 100 en poids la capacité en eau utile des cailloux. Mais il est vraisemblable de penser qu'elles jouent d'autres rôles. LAMB J. J. et CHAPMAN J. E. (1943) ont montré que la présence de cailloux à la surface du sol réduisait le ruissellement et augmentait d'autant la quantité d'eau infiltrée. Il est possible aussi que l'évaporation en surface soit réduite par un effet de mulch. Enfin les cailloux augmenteraient la perméabilité de la masse du sol.

VII. — INFLUENCE DES TECHNIQUES DE PRÉPARATION AVANT PLANTATION, : DÉFONCEMENT ET PLANTATION AU TROU

Dans certains vergers étudiés, on a procédé, avant plantation, à un travail du sol. On peut s'interroger sur l'intérêt de ce travail préalable du sol et voir comment il modifie la profondeur d'enracinement.

1° *Défoncement*

Une série d'observations faites en sols limoneux ou sablo-argileux montre, que dans beaucoup de cas, les traces de défoncement sont visibles sur le profil après des périodes de 4 à 10 ans. La zone défoncée apparaît beaucoup plus meuble au couteau et par ailleurs la limite entre la zone ameublie par la charrue et la zone travaillée est toujours très nette. La majorité de l'enracinement se trouve dans la zone ameublie. Par ailleurs il est fréquent de voir de petites racines circuler à la limite de la zone travaillée, avant de pénétrer dans la zone non travaillée. Ceci indique que la terre soumise au défoncement est beaucoup plus favorable à la croissance des racines, tandis que le sol non travaillé constitue dans une certaine mesure un obstacle. Les sols où les traces de défoncement étaient nettes avaient une stabilité structurale médiocre à très mauvaise. Ce sont là des conditions où les sous-solages ne persistent pas plus d'un an au maximum. La contradiction apparente entre ces deux observations provient peut-être du fait que le défoncement est un labour qui modifie l'ensemble de la couche travaillée tandis que le sous-solage, travail sans retournement intervient seulement au voisinage du soc. Il y aurait ainsi lors des précipitations une meilleure répartition de l'eau de pluie dans le sol défoncé que dans le sol sous-solé, où l'eau pénètre préférentiellement dans la fente laissée par la sous-soleuse. Ainsi la destruction des agrégats par l'eau serait-elle plus intense dans ce dernier cas.

Sur sol sableux et sablo-caillouteux, quoiqu'on ne puisse mettre en évidence une action du défoncement sur l'ameublissement, cette technique n'est pas toujours sans résultat comme le montrent les observations suivantes : le profil cultural avant défoncement se présentait comme ceci :

0-30 cm brun gris humifère sableux, structure monoparticulaire — Racines abondantes.

30 cm brun-rouge sablo-argileux — Structure continue à faiblement polyédrique — quelques petites racines à la partie supérieure de l'horizon. Après défoncement jusqu'à 70 cm, il y avait mélange, par bandes correspondant aux passages de la charrue, de la terre de surface organique à l'horizon profond.

L'enracinement est bien réparti de la surface à 70 cm de profondeur du fait de l'exploitation de la terre organique enfouie. Les Pêchers *Amsden* sur franc âgés de

8 ans y ont une circonférence moyenne du tronc de 32,6 cm, supérieure (quoique de façon non significative) à celle des Pêchers de 9 ans plantés sur simple labour de 31 cm,5, (MAURY P. (1960). Par ailleurs les arbres plantés après défoncement auraient présenté une meilleure résistance à la sécheresse et un rendement plus important. Dans ce cas particulier, tous ces effets favorables sont peut-être dus à un certains ameublissement résultant du défoncement, mais surtout au mélange de l'horizon superficiel riche en matière organique au reste de la terre. Il est vraisemblable de penser que l'effet aurait été moins net si l'horizon superficiel n'avait pas une teneur aussi élevée en matière organique. On voit ainsi toute l'importance de la constitution du profil sur l'efficacité du défoncement.

Sur un autre sol sableux défoncé, on a vu les racines se localiser préférentiellement dans les bandes de terre plus organique enfouie lors du travail du sol.

Nous allons essayer de préciser quantitativement l'action du défoncement sur la profondeur de l'enracinement et la vigueur de l'arbre, mesurée par la longueur de la circonférence du tronc. Il a été préalablement vérifié graphiquement que pour la population considérée, la profondeur de l'enracinement principal était indépendante de l'âge de plantation. Sur les sols étudiés aucune fumure de fond n'avait été appliquée.

L'examen du graphique profondeur d'enracinement profondeur de défoncement (fig. 12) construit pour 29 sols (Vallée du Rhône et aussi C. E. T. A. de Chavanay, Maclas, la Voulte) montre qu'il y a une tendance à l'enracinement plus profond lorsque la profondeur du labour de défoncement augmente. Cette tendance est très atténuée pour les sols sableux. Ceci nous a conduit à étudier séparément les 2 populations. Pour les sols limoneux il existe une régression significative (point 1 p. 100 de SNEDECOR) entre :

r = profondeur d'enracinement
d = profondeur de défoncement
$r = 1997.\ 1/d + 98{,}2$ (fréquence 12)

Pour les sols sableux la régression n'est plus significative (point 20 p. 100) pour un ensemble de 17 observations. *Ainsi la profondeur du labour de défoncement n'influence la profondeur atteinte par les racines que dans le cas des sols limoneux.*

L'action de la profondeur de défoncement d sur la longueur de la circonférence du tronc y, peut s'étudier au moyen d'une corrélation. Il est alors nécessaire de faire intervenir dans les calculs l'âge de l'arbre x_1. Avec les sols limoneux, on obtient l'équation suivante :

$$y = 25{,}63 \log x_1 - 935{,}40 \times 1/d + 27{,}8.$$

L'analyse de la variance est contenue dans le tableau suivant :

	Degrés de liberté	Variance	F
Variation totale	11	—	
Régression double en log x_1 et $1/d$	2	176,69	5,10*
Régression de log x_1	1	121,83	—
Régression de $1/d$ après ajustement de log x_1	1	231,55	6,68*
Régression de $1/d$	1	180,26	
Régression de log x_1 après ajustement de $1/d$	1	173,12	4,99
Variation résiduelle	9	34,64	—

On constate qu'après ajustement de la variable x_1 (âge) la profondeur de défoncement d explique significativement (point 5 p. 100) la variation de la longueur de la circonférence du tronc. *En sol limoneux, la longueur de la circonférence du tronc de l'arbre est d'autant plus grande que le labour de défoncement est plus profond.*

Des calculs analogues faits pour les sols sableux ont conduit à une régression double significative. Mais la régression de y en $1/d$, après ajustement de la variable x_1 n'est plus significative (test F de 4,04, alors que le point 5 p. 100 est de 4,54). Il n'y a pas d'action nette sur la vigueur de l'arbre.

Nous pouvons maintenant, en possession des observations et analyses statistiques précédentes, préciser les facteurs de l'efficacité du défoncement. Ce sont :

— la structure du sol. L'efficacité est montrée pour les sols à structure continue

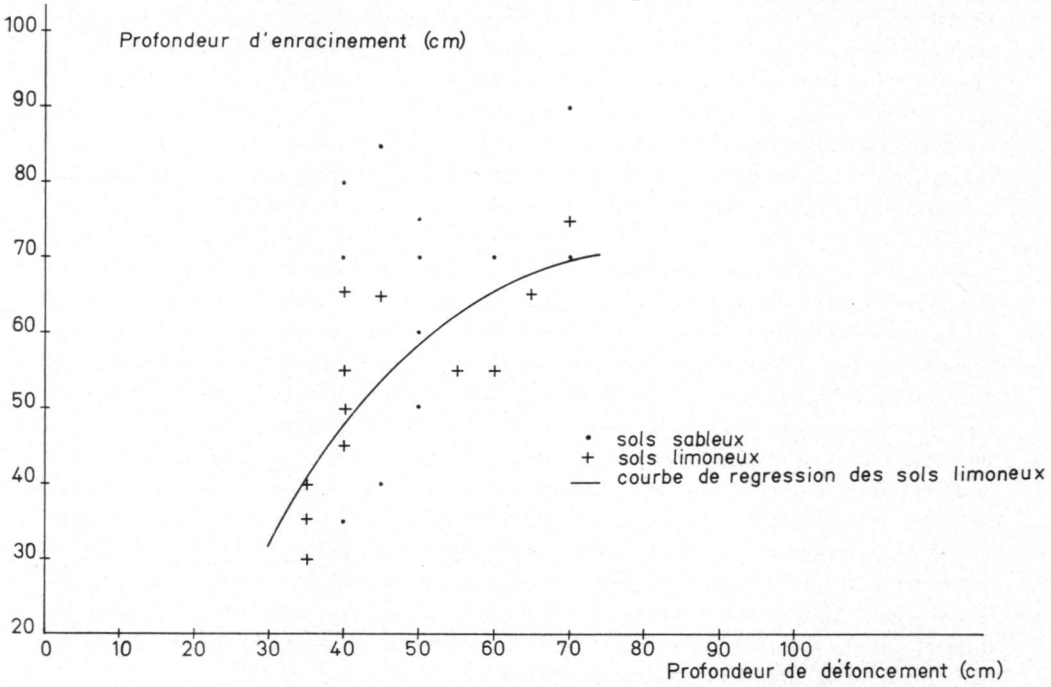


FIG. 12. — *Relation entre profondeur d'enracinement et profondeur de défoncement pour sols sableux et limoneux. La courbe de régression est relative aux sols limoneux*

et à stabilité médiocre (sols limoneux) où le labour profond avant plantation améliore l'ameublissement. Pour des sols à structure monoparticulaire et à texture grossière (sol sableux et sablo-caillouteux) l'efficacité doit être nulle du strict point de vue de la structure. Il n'est cependant pas exclu qu'il n'y ait pas d'action sur les sols sableux contenant une proportion importante d'éléments fins.

— la constitution du profil. Le labour de défoncement est efficace lorsqu'il permet de répartir sur une plus grande épaisseur un matériau de bonnes propriétés physiques. C'est le cas de l'exemple déjà cité où la terre d'un horizon humifère de surface épais de 30 cm a été mélangée sur une épaisseur de 70 cm à une terre non organique.

— La profondeur de terre travaillée qui détermine l'épaisseur de la couche ameublie, ou améliorée par mélange d'horizon.

Ainsi le défoncement est efficace en sol limoneux par son action sur la structure et il peut l'être en sol sableux meuble lorsqu'il permet de répartir sur une plus grande épaisseur une terre riche en matière organique. Ces conclusions ne sont évidemment valables que dans le cas où le profil ne présente pas en profondeur des couches à excès d'eau temporaire ou permanent.

2° *Plantation au trou*

Il faut enfin dire un mot des plantations qui s'effectuent sans défoncement. Nous aurions pu les considérer comme des défoncements de profondeur nulle, mais alors, sur les graphiques profondeur d'enracinement, profondeur de défoncement, les points représentatifs apparaissaient comme faisant partie d'une population différente. Renseignements pris, lorsqu'on ne procède pas au défoncement à la charrue, on creuse des trous de plantation beaucoup plus importants de 30 à 50 cm de profondeur, ce qui revient à un véritable défoncement limité en largeur (trou de 70 à 50 cm de diamètre). Il s'agit donc d'une technique de préparation du sol particulière que nous avons considérée à part, quoiqu'elle revienne en un certain sens à un défoncement. Elle semble influencer favorablement la profondeur d'enracinement.

Notons qu'il peut y avoir accumulation d'eau lors de précipitations exceptionnelles dans les parcelles défoncées ou dans les trous de plantation (Telliez, 1951). En effet, l'infiltration de l'eau se fait beaucoup mieux dans un sol récemment défoncé où la perméabilité est plus élevée. Si les horizons profonds du sol non labouré ne présentent pas une perméabilité suffisante, la couche de surface défoncée sera gorgée d'eau. L'eau ainsi rassemblée provient des précipitations tombant sur la parcelle elle-même, mais également de l'eau de ruissellement et de drainage des parcelles adjacentes non défoncées. Le creusement d'un fossé de ceinture de profondeur supérieure à celle du défoncement supprimera les apports d'eau des autres parcelles et facilitera le ressuyage de la parcelle elle-même.

Le défoncement apparaît comme une technique d'efficacité fort différente selon la constitution du profil (horizon humifère de surface) et les propriétés structurales du sol (défoncement sans intérêt pour un sol à structure et stabilité excellentes). Une fois ces réserves faites, c'est un procédé qui peut augmenter la profondeur d'enracinement et par voie de conséquence, la vigueur du Pêcher.

VI. — REMARQUES SUR LES PORTE-GREFFES AUTRES QUE LES FRANCS

Tous les résultats précédents s'appliquent à des porte-greffes qui sont des francs.

Quelques rares observations ont pu être faites sur Pêchers greffés sur pruniers ou sur hybrides Pêcher-amandier. Il ne semble pas à première vue y avoir de différences au point de vue profondeur exploitée entre les divers porte-greffes.

Par contre les Pruniers seraient beaucoup plus résistants à l'excès d'eau que les francs. Nous avons observé des Pêchers sur Pruniers présentant des vigueurs

beaucoup plus importantes que des francs en sols de limon. TELLIEZ (1952) signale la résistance des Pêchers greffes sur *St-Julien* aux excès d'eau de 1951 en sols limoneux, alors que les Pêchers sur franc avaient été sèvèrement touchés.

Le Prunier pourrait être conseillé en zone humide. Malheureusement il n'est pas indemne de maladies à virus et il faut attendre qu'une sélection sérieuse ait pu obtenir des clones sains.

CONCLUSIONS

Dans une région de la vallée du Rhône, on a montré que les pêchers présentent des vigueurs différentes sur les divers types de sol. Les sols sableux à plus de 10 p. 100 d'argile sont les plus favorables, tandis que les sols limoneux et les sols sableux à moins de 10 p. 100 d'argile le sont beaucoup moins.

Nous pouvons donner une interprétation de ces différences à la lumière de l'ensemble des résultats obtenus. Il est logique de penser que les propriétés favorables des sols sableux à plus de 10 p. 100 d'argile proviennent de la présence d'une certaine quantité d'éléments fins qui améliorent les propriétés physico-chimiques (capacité d'échange de base, pouvoir tampon) et la capacité en eau utile. Les propritétés défavorables des sols sableux à moins de 10 p. 100 d'argile seraient à attribuer, en plus de mauvaises propriétés physico-chimiques, à une faiblesse de la teneur en eau utile (inférieure de moitié à celle du sol précédent). Quant aux limons, bien qu'ils possèdent une rétention en eau satisfaisante, leur structure continue leur confère une faible porosité. Après une précipitation, le ressuyage lent de l'eau pourrait provoquer temporairement une aération insuffisante pour le fonctionnement optimum des racines du Pêcher.

Dans la plupart des cas, l'alimentation en eau constitue un facteur limitant, surtout pour les variétés précoces. L'augmentation de la profondeur d'enracinement peut améliorer la situation, sans toutefois parvenir à combler la totalité de la différence entre la capacité de réserve moyenne et le déficit normal de la pluviométrie sur l'évapotranspiration. La présence d'importantes quantités de cailloux dans certains sols n'a pas d'influence défavorable sur la vigueur. Ceci tient, outre le rôle des pierres sur la couverture du sol (effet de mulch), l'échauffement de la terre et l'infiltration de l'eau, à une importante rétention d'eau qui peut être cédée aux racines de l'arbre par l'intermédiaire de la terre fine.

Les labours profonds du sol avant plantation ont une efficacité très différente selon les situations. Ils sont utiles dans les sols à structure médiocre par une action d'ameublissement. Dans les sols sableux meubles, leur utilité provient éventuellement de la répartition sur une plus grande épaisseur d'un horizon de surface très organique.

La rentabilité d'une plantation dépend, du strict point de vue technique, de son rendement cumulé sur une certaine période c'est-à-dire de la quantité de fruits récoltés en un laps de temps donné ayant pour origine la date de plantation.

Or nous venons de voir que les propriétés physiques du sol ont une influence considérable sur la vigueur et la longévité des arbres et que leurs inconvénients sont étroitement liés aux aléas climatiques. Par ailleurs, certains de ces inconvénients peuvent être compensés par des traitements particuliers du sol avant ou après plan-

tation. Il ressort de ces considérations que les vergers vont se comporter de façon aléatoire et que la probabilité de réussite de chaque situation dépend de l'action de l'ensemble des facteurs que nous venons d'envisager.

REMERCIEMENTS

L'exécution d'un travail comme le précédent implique la collaboration des arboriculteurs. A ce sujet nous remercions les membres des C.E.T.A. du nord de la Drôme et de l'Isère, qui ont bien voulu nous donner accès à leurs vergers et faciliter nos observations. Nous n'oublierons pas les ingénieurs de ces C.E.T.A. qui nous ont guidé dans cette tournée et nous ont fourni des indications précieuses.

Par ailleurs nous remercions vivement de leur collaboration les ingénieurs des Délégations agronomiques de l'Office national industriel de l'Azote couvrant la région étudiée et notamment P. MAURY de la délégation d'Aix en Provence.

Enfin signalons l'aide apportée par les ingénieurs de l'Association pour l'expansion de la productivité en agriculture de la zone Sud-Est, lors de tournées dans cette région.

Reçu pour publication en mars 1962.

SUMMARY

SOME RELATIONSHIPS BETWEEN THE PHYSICAL PROPERTIES OF SOIL AND THE GROWTH OF PEACH TREES IN THE RHÔNE VALLEY, BETWEEN VIENNE AND VALENCE

The relationships between physical properties of the soil and growth of the peach tree was studied in a region of the Rhône valley. The method applied consisted of the direct observation of physical soil-properties and rooting on a soil profile in established orchards. For judging the aerial parts of the trees, the dual criterion of the length of the circumference and age of trunk was introduced in substitution for the difficultly ascertainable individual yields. In this way, certain physical properties of the soil could be statistically correlated with the vigour of the tree.

The vigour of peach trees varied with texture ; sandy soils with more than 10 p. 100 clay were the most favourable while tree growth was less vigorous in sandy soils with less than 10 p. 100 clay and in loamy soils.

Structural properties (Undisturbed structure and structural stability) played a role in the longevity and vigour of the trees .

The vigour of peach trees was directly affected by the field capacity of soil. Pebbles in certain soils retain large amounts of water and contribute to the water nutrition of the trees.

Trenching before planting is efficient on loamy soils, but is less effective than incorporation of organic wather on loose sandy soils.

ZUSAMMENFASSUNG

ÜBER EINIGE BEZIEHUNGEN ZWISCHEN DEN PHYSIKALISCHEN EIGENSCHAFTEN DES BODENS UND DEM WACHSTUM DES PFIRSIAHBAUMES IM RHÔNETHAL ZWISCHEN VIENNE UND VALENCE

Die Untersuchung der Beziehungen zwischen den physikalischen Eigenschaften des Bodens und dem Wachstum des Pfirsichbaumes wurden für eine Gegend des Rhônethales durchgeführt. Die zur Anwendung kommende Methode besteht in der Untersuchung der Beziehungen zwischen den Bodeneigenschaften und der Bewurzelung durch direkte Beobachtung des Bodenabschnitts.

Um die oberen Teile eines Baumes zu beurteilen, hat man die schwer festzustellenden Einzelerträge durch den Doppelspant Baumumgfang-Alter ersetzt. Auf diese Art kann man statistisch einige physische Bodeneigenschaften an die Wuchskraft des Baumes binden.

Die Wuchskraft des Pfirsichbaumes ändert sich mit der Textur. Sandige Böden mit mehr als 10 p. 100 Ton sind am günstigsten ; hingegen wachsen in Böden mit unter 10 p. 100 Ton und in den Lehmböden die Bäume weniger stark.

Die Struktureigenschaften (Struktur am Standort und Stabilität der Struktur) spielen eine Rolle in der Langlebigkeit und Wuchskraft der Bäume.

Die Kapazität der Wasserreserven beeinflusst unmittelbar die Wuchskraft des Pfirsichbaumes. Die Kieselsteine gewisser Böden halten eine wichtige Menge Wasser zurück und tragen zur Wasserversorgung der Bäume bei.

Das Rigolen vor dem Pflanzen ist in Lehmböden wirksam ; in sandigem, losem Boden ist der Wert dieser Kulturmassnahme dem Einbringen organischer Dünger unterstellt.

О некоторых соотношениях между физическими свойствами почвы и ростом персика в долине Роны между Виенн и Валанс.

Р. ГРА (Версаль).

Соотношение между физическими свойствами почв и ростом персика подверглось изучению в определенном районе долины Роны. Примененный метод сводился к изучению способом прямого наблюдения в данном разрезе почвы существующих садов, за отношением между свойствами почвы и корневой системой. Для суждения о надземных частях дерева — понятие индивидуального валового сбора который не всегда можно точно определить, было заменено соотношением : величина обхвата ствола — возраст. Таким образом и была установлена статистическая связь между некоторыми физическими свойствами почвы и мощностью дерева.

Мощность персика неодинакова в почвах с различным механическим составом : песчаные почвы с количеством глины превышающим 10 % — наиболее благоприятны; и наоборот, на песчаных почвах содержащих менее 10 % глины, также как на почвах суглинистых — произрастают деревья менее мощные.

Играют также роль в долговечности и мощности деревьев — структурные свойства (структура почвы и ее водопрочность).

Влагоемкость почвы — прямо влияет на мощность персика. Гравий некоторых почв удерживает крупные количества влаги и помогает таким образом водному питанию деревьев. Сверхглубокая плантажная вспашка оказывает благоприятное действие в суглинистых почвах; в почвах песчаных, рыхлых, благоприятное действие этой вспашки находится в зависимости от заделки органических веществ.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ALWAY F. J., Mc DOLE G. R., 1917. Relation of the water retaining capacity of a soil to its hygroscopic coefficient. *J. Agric. Res.*, **9**, 27-71.

ANNE P., 1945. Sur le dosage rapide du carbone organique des sols. *Ann. agron.*, **15**, 161-172.

BOURRIER J., 1959. Problème posé par la présence des cailloux dans les sols irrigués. Direction générale du Génie rural et de l'Hydraulique agricole. Imprimerie Nationale, Paris.

COILE T. S., 1953. Moisture content of small stones in soil. *Soil sci.*, **75**, 203-207.

FEODOROFF A., 1961. Capacité de rétention pour l'eau et structure du sol. *C. R. Acad. Sci.*, **252**, 591-593.

GRAS R., 1961. Influence des propriétés physiques du sol sur la croissance du Pommier dans la Sarthe. *Ann. agron.*, **12**, 208-248.

GRAS R., MONNIER G., Contribution des éléments grossiers à la réserve en eau utile des sols. A paraître. C. R. Acad. Sc.

De GRAAF H. F., 1939. The peach enterprise in Western New York. *Cornell, Univ. agric. Exp. Stat., Bull.* n° 710

GROSCLAUDE C., 1960. Le plomb des arbres fruitiers — Mise au point bibliographiques. *Ann. Épiphyties* nº 3.

HALLAIRE M., 1960. Le problème du potentiel de l'eau dans le sol et de la disponibilité de l'eau pour la végétation. *Ann. Physiol. vég.*, **2**, 119-130.

MC HATTON T. H., 1947. The comparison of plot size in a peach experiment. *Proc. Amer. Soc. Hort. Sci*,. **49**, 18-20.

HENIN S., et *al.*, 1958. Méthode pour l'étude de la stabilité structurale des sols. *Ann. agron.*, **28**, 71-90.

HENIN S., et *al.*, 1960. Le Profil cultural. Principe de physique du sol. 11-85. Société d'édition des Ingénieurs Agricoles, Paris.

LAMB, CHAPMAN, 1943. Effect of surface stones on erosion évaporation température and soil moisture. *J. Amer. Soc. Agron.*, **35**.

LARSEN J. A., 1930. Forest types of the northern. Rocky mountains an their climatic control. *Ecology*, **11**, 631-672.

LUTZ H. J., CHANDLER R. F., 1946. Forest soils. John Wiley, New York.

MARSHALL T. J., 1945. Tension of water in a sandy soil at field capacity. *J. Inst. Agric., Sci.*, **2**.

PEARSON G. A., MARSH R. E., 1935. Timber growing and logging pratice in the Southwest and in the Black Hills reg. *U. S. Dept. Agr. Tech. Bull.* nº 480.

RICHARDS L. A., 1941. A pressure membrane extraction apparatus. *Soil sci.*, **51**, 377-386.

RICHARDS L. A., MILTON FIREMAN, 1943. Pressure plate apparatus for measuring moisture sorption and transmission by soils. *Soil, sci.*, **56**, 395-404.

RICHARDS L. A., WEAVER L. R., 1944. Moisture retention by some irrigated soils as related to soil moisture tension. *J. Agric. Res.*, **69**,.

SALTER P. J., HAWORTH F., 1961. The available water capacity of a sandy loam — II. The effect of farmyard manure and different primary cultivation. *J. Soil Sci.*, **12**, nº 2.

TELLIEZ J., 1952. L'asphyxie des pêchers dans le Sud-Ouest en 1951. *B. T. I.*, nº 69, mai.

TURC L., 1961. Évaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle : formule climatique simplifiée et mise à jour. *Ann. agron.*, **12**, 13-49.

Le Directeur-Gérant : M. L. CAGNAC

Imprimerie BUSSIÈRE à Saint-Amand (Cher), France. — 30-8-1962.
Dépôt légal : 3e trimestre 1962. Nº d'impression : 755.

Ann. agron., 1962, **13** (3), 175-201.

Vol. 13 - n° 3 - 1962 -

631. 811. 3 : 631. 41

PROPRIÉTÉS PHYSICO-CHIMIQUES DES SOLS ET ALIMENTATION POTASSIQUE DES PLANTES

R. BLANCHET, R. STUDER et Colette CHAUMONT

Station agronomique, Châteauroux (Indre)

SOMMAIRE

L'influence des diverses propriétés physico-chimiques du sol (capacité d'échange, nature des colloïdes, énergie d'adsorption, concentration des solutions du sol, degré de saturation en ions K^+) sur l'alimentation potassique des plantes a d'abord été étudiée sur des sols synthétiques ne présentant pas de phénomènes de rétrogradation et de régénération. Deux facteurs apparaissent très largement prédominants : la quantité d'ions K^+ échangeables disponibles, et le développement des systèmes radiculaires.

L'étude de l'alimentation potassique en présence d'argiles illitiques altérées a été ensuite abordée : mobilité des ions K^+ retenus par ces argiles, rythmes comparés d'épuisement et de régénération, nature des argiles et réaction aux apports d'engrais. Ces diverses données sont discutées.

INTRODUCTION

Dans l'étude de l'alimentation potassique des plantes à partir des réserves du sol, deux cas principaux doivent être distingués :

1° Celui, relativement rare, des sols dans lesquels il ne se produit pas de phénomènes de rétrogradation et de régénération d'ions K^+ ; cela suppose que ces sols soient dépourvus d'argiles des types illites et vermiculites, et qu'ils ne renferment pas de minéraux libérant progressivement du potassium au cours de leur altération (micas, feldspaths...). L'alimentation s'effectue alors uniquement aux dépens d'un stock déterminé d'ions K^+ échangeables.

2° Le cas, beaucoup plus fréquent, des sols renfermant des argiles illitiques qui peuvent donner lieu à des rétrogradations et régénérations d'intensité variable

selon la teneur en illites et le degré d'altération de celles-ci (ANTONIANI, 1955 ; SCHUFFELEN 1955 ; VAN DER MAREL, 1955 ; FRANC DE FERRIÈRE, 1960 ; MORTLAND, 1961).

Pour les raisons indiquées ci-dessus, l'étude de l'alimentation potassique des plantes aux dépens d'une quantité bien déterminée d'ions K^+ échangeables ne s'applique sans doute directement qu'à un nombre limité de sols, qui ne présenteraient ni régénérations ni rétrogradations au cours d'une période végétative. Cette étude présente néanmoins un grand intérêt, car elle permet de connaître les mécanismes qui interviennent dans l'absorption, à un instant donné, dans un sol quelconque possédant à cet instant une teneur déterminée en ions K^+ échangeables. Il paraît en effet raisonnable d'admettre qu'à l'instant considéré la plante s'alimente à partir des ions K^+ échangeables, qui peuvent être constamment renouvelés par un flux d'ions K^+ rétrogradés (CHAMINADE, 1953).

Cet aspect simplifié de l'alimentation potassique est lui-même très controversé : à la théorie classique de l'alimentation à partir de la solution du sol s'est ajoutée la théorie des effets de contact racines-particules de sol (JENNY, 1953), qui a suscité de nombreuses études souvent contradictoires (LAGERWERFF, 1960). Ainsi que le souligne WALKER (1960), les techniques expérimentales adoptées en la matière revêtent une importance primordiale, et on ne peut extrapoler aux conditions naturelles les résultats obtenus en quelques heures sur des racines excisées.

Nous avons adopté des techniques plus longues et plus laborieuses, mais plus proches de la réalité agricole, consistant à faire végéter des plantes pendant plusieurs mois sur des sols synthétiques de composition exactement connue et de propriétés physico-chimiques variables, ne présentant pas de phénomènes de rétrogradation et de régénération. Nous examinerons ici les relations entre l'alimentation potassique et ces diverses propriétés, puis nous indiquerons quelques premiers résultats relatifs à la mobilité et à l'utilisation par les végétaux des ions K^+ retenus par des illites altérées.

A — L'ALIMENTATION POTASSIQUE EN L'ABSENCE DE PHÉNOMÈNES DE RÉTROGRADATION ET DE RÉGÉNÉRATION

TECHNIQUES EXPÉRIMENTALES UTILISÉES

Deux expériences principales ont été effectuées ; nous les décrirons succinctement.

Expérience I

Dans cet essai, du ray-grass d'Italie (*Lolium italicum*) a été cultivé pendant plusieurs mois selon la technique de CHAMINADE (1960) dans des sols synthétiques constitués par des mélanges d'argile et de quartz broyé additionnés éventuellement d'humate calcique.

Les argiles, Kaolinite des Eyzies et Montmorillonite de Camp-Bertaux, ont été purifiées selon les techniques habituelles (BLANCHET, 1959 *a*) ; les fractions inférieures à 10 μ environ ont été retenues. L'humate calcique avait été extrait d'un terreau par l'oxalate d'ammonium, lavé et neutralisé par l'eau de chaux (CHAMINADE, 1946). Le diamètre des grains de quartz broyé était compris entre 2 et 4 mm.

Le tableau 1 indique les quantités de colloïdes introduites par pot, c'est-à-dire pour 1 kg de sol synthétique. Les capacités d'échange de cations de ces divers colloïdes étaient les suivantes : Kaolinite (renfermant un peu d'halloysite) : 18 méq par 100 g ; Montmorillonite : 112 méq par 100 g ; humate calcique : 200 méq par 100 g. Pour chacun des mélanges, dont les capacités d'échange de cations T mesurées par l'acétate d'ammonium neutre variaient de 25 à 250 méq par kg, cinq rapports 100 K/T exprimés en méq ont été réalisés : 1,25 ; 2 ; 3,5 ; 6,5 ; 10,5. Les sols renfermaient ainsi de 14,8 à 1 018 mg de potassium échangeable par kg.

TABLEAU I

Quantités de colloïdes introduites dans les sols synthétiques, méq par pot contenant 1 kg de sol (expérience I) :

Capacité d'échange réalisée	Quantités de colloïdes introduites, méq			Rapports K/T réalisés
	Kaolinite	Montmorillonite	Humate Ca	
25	25	—	—	1,25 à 10,5
25	—	25	—	—
50	50	—	—	—
50	—	50	—	—
50	40	—	10	—
50	—	40	10	—
50	25	—	25	—
50	—	25	25	—
100	—	100	—	—
150	—	150	—	—
200	—	200	—	—
250	—	250	—	—

Les autres éléments étaient apportés en quantités largement suffisantes : rapport uniforme Mg/T = 0,12 ; Ca en quantité suffisante pour que le pH soit de 7 ; P, S, Fe, Cu, Mn, Zn, B, Mo en quantités convenables ; 80 mg N au départ, et compensation des exportations après les cinq coupes successives.

Les quantités de potassium absorbées entre chaque coupe ont été déterminées par l'analyse des plantes. A la fin de l'expérience, le potassium introduit avait été à peu près totalement absorbé ; l'analyse des sols après la culture montre qu'il n'y a eu ni rétrogradations ni régénérations appréciables.

En même temps que ces sols synthétiques, une série de sols naturels très divers a été soumise aux mêmes cultures, sans addition de potassium, et en assurant l'alimentation en tous les autres éléments. Nous reviendrons sur la nature de ces sols dans la deuxième partie de ce mémoire.

Expérience II

Cet essai était destiné à vérifier et compléter les résultats du précédent, en rapprochant les conditions de celles qui existent dans la nature, et en étudiant plusieurs espèces végétales. A cet effet, les cultures ont été effectuées dans des vases renfermant 10 kg de sols semi-artificiels obtenus par des mélanges de quartz broyé et d'un sous-sol très argileux prélevé dans un dépôt cénomanien. Ce sous-sol a été choisi en raison des très faibles régénérations et rétrogradations qu'il a présentées au cours d'essais préalables. Les caractères de ce sous-sol, ainsi que ceux des mélanges réalisés, sont indiqués dans le tableau 2 ; les mélanges I, II et III renfermaient respectivement 10 p. 100, 20 p. 100 et 40 p. 100 de sous-sol argileux intimement mélangé au quartz, et possédaient des capacités d'échange T de 50, 100 et 200 méq par kg.

Ce sous-sol est alcalin (pH 8,2), quoique non calcaire. L'argile est caractérisée par sa très faible teneur en potassium (0,5 p. 100), et une capacité d'échange de 60 méq pour 100 g ; il s'agit vraisemblablement d'un mélange de Kaolinite et de Montmorillonite (STEINBERG, 1961).

Les mélanges I, II et III ont été subdivisés en quatre lots, et les rapports 100.K/T suivants ont été réalisés : 1,25 ; 2,5 ; 5 ; 10. Les teneurs en K_2O échangeable variaient ainsi, selon la capacité d'échange et le rapport K/T, de 0,03 à 0,94 p. 1 000 de sol (voir tableau 2). Ces sols ont été pourvus de quantités convenables de tous les éléments : N, P, S, B, Mo, Cu, Mn, Zn ; les teneurs en Ca, Mg et Fe étaient largement suffisantes.

TABLEAU 2

Composition du sous-sol initial et des sols synthétiques utilisés (expérience II) :

Caractères	Sous-sol initial	Sols synthétiques		
		I	II	III
En % de terre :				
Argile	83,6	6,5	13	26
Limon	7,7	0,4	0,8	1,6
Sable très fin	2,2	0,8	0,8	1,3
Sable fin	3,2	2,9	2	3,5
Sable grossier	3,3	26	24	18,5
Éléments > 2 mm	0	61,7	59	47,1
Matière organique	Traces	—	—	—
En méq par kg de terre :				
C. E. C	491	50	100	200
K	4,67	0,625 à 5	1,25 à 10	2,5 à 20
Ca	508	51,5	103	206
Mg	86,3	8,8	17,6	35,2
Na	12,7	1,3	2,6	5,2
pH	8,2	7,9	7,9	8,05

Trois cultures différentes ont été effectuées sur ces divers milieux : ray-grass d'Italie, trèfle violet var. *Sepia* et luzerne Orchésienne, afin de comparer l'alimentation de plantes à systèmes radiculaires très différents :

— ray-grass : chevelu très développé, faible capacité d'échange de cations des racines ;
— luzerne : chevelu réduit, capacité d'échange des racines élevée (BLANC-AICARD, 1955) ;
— trèfle violet : caractères intermédiaires.

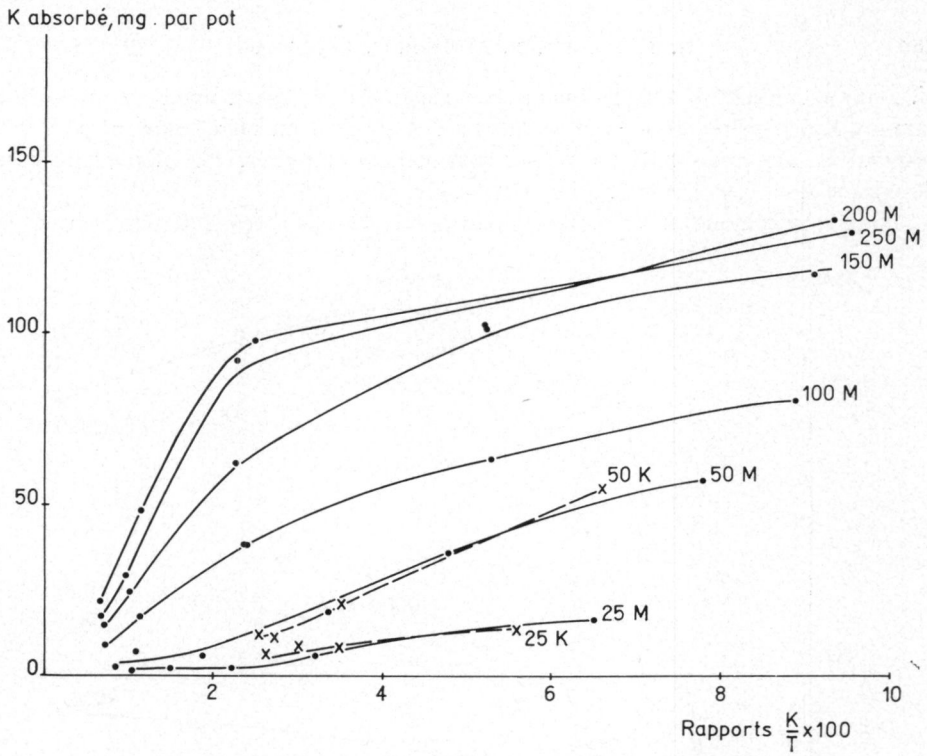
Quatre coupes successives ont été effectuées sur chacune de ces cultures, à l'époque de la floraison. Après chaque coupe, les exportations d'azote étaient compensées par un apport de nitrate d'ammonium, même sur les légumineuses. A la fin de la culture, les systèmes radiculaires ont été isolés et pesés. La capacité d'échange de cations des racines a été mesurée sur les échantillons les plus caractéristiques, selon la technique exposée par BLANC-AICARD (1955). Le dosage du potassium échangeable restant dans le milieu a été effectué, afin de contrôler que les rétrogradations et régénérations ont été faibles.

RÉSULTATS

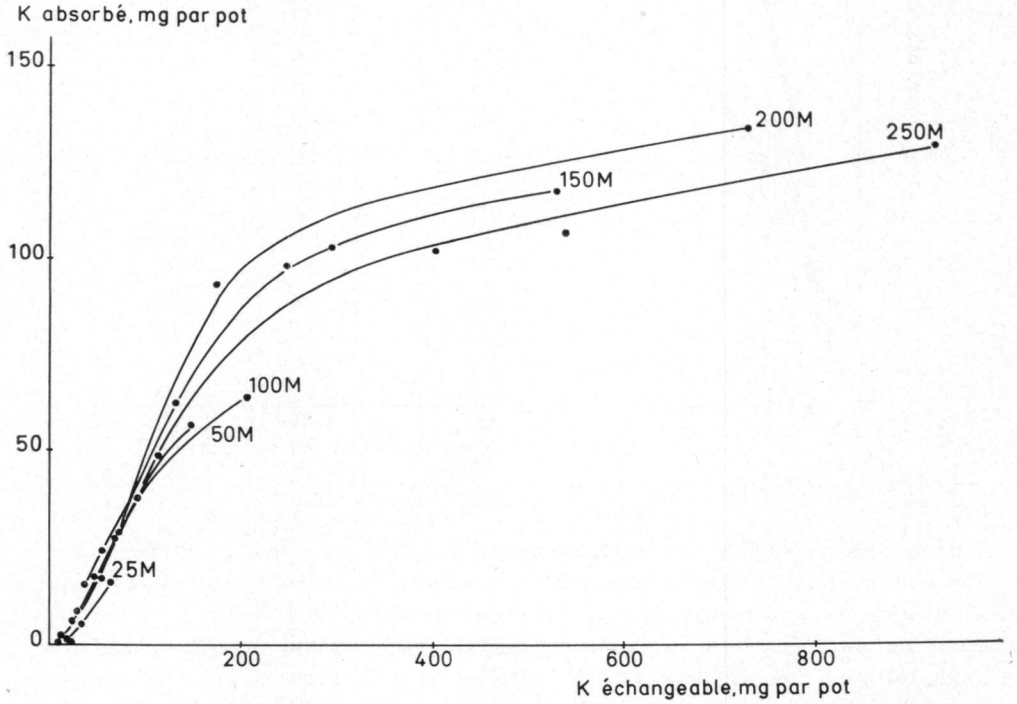
Les résultats obtenus au cours des deux expériences sont parfaitement concordants, quoique les quantités de sol mises à la disposition des plantes aient varié largement. Nous exposerons surtout les résultats de l'expérience I, qui comprenait une gamme plus étendue de milieux.

1° *Le rapport K/T du milieu n'exerce pas d'influence directe sur l'alimentation potassique des plantes, au cours d'une longue période de végétation.*

Cette constatation apparaît en comparant les graphiques 1 et 2. Le graphique 1 représente les quantités de potassium absorbées par le ray-grasss entre la première et la deuxième coupe, dans les divers milieux, en fonction des rapports K/T de ceux-



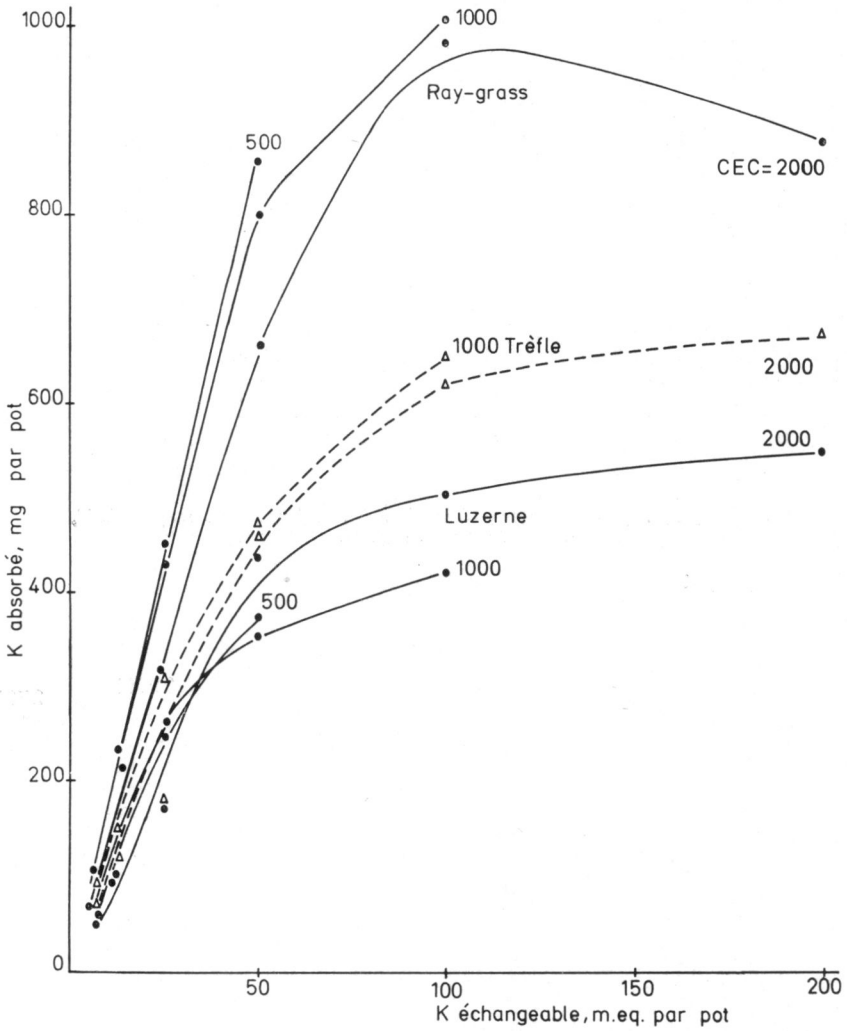
GRAPHIQUE 1. *Quantités de potassium absorbées, en fonction des rapports* K/T, *aux diverses teneurs en argiles (expérience I).*



GRAPHIQUE 2. *Quantités de potassium absorbées, en fonction des teneurs en potassium échangeable, à diverses capacités d'échange de cations (expérience I).*

ci. Dans un milieu donné, l'alimentation augmente certes en même temps que le rapport K/T, qui reflète l'enrichissement en K, mais à un même rapport K/T correspondent des alimentations considérablement différentes. Le rapport K/T ne détermine donc pas l'alimentation potassique.

Sur le graphique 2, les mêmes quantités de K absorbées sont représentées en

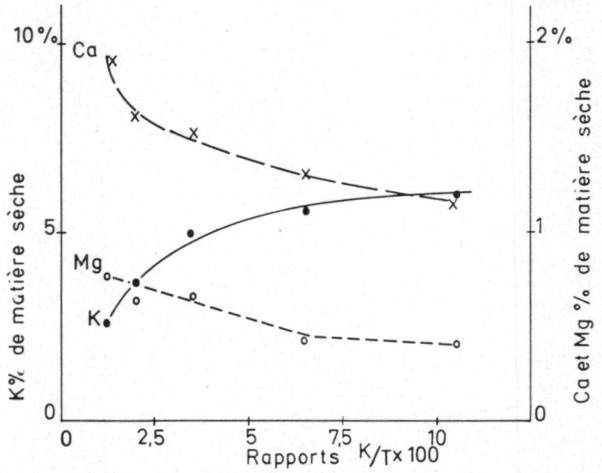


GRAPHIQUE 3. *Quantités de potassium absorbées, en fonction des teneurs en potassium échangeable, à diverses capacités d'échange (expérience II).*

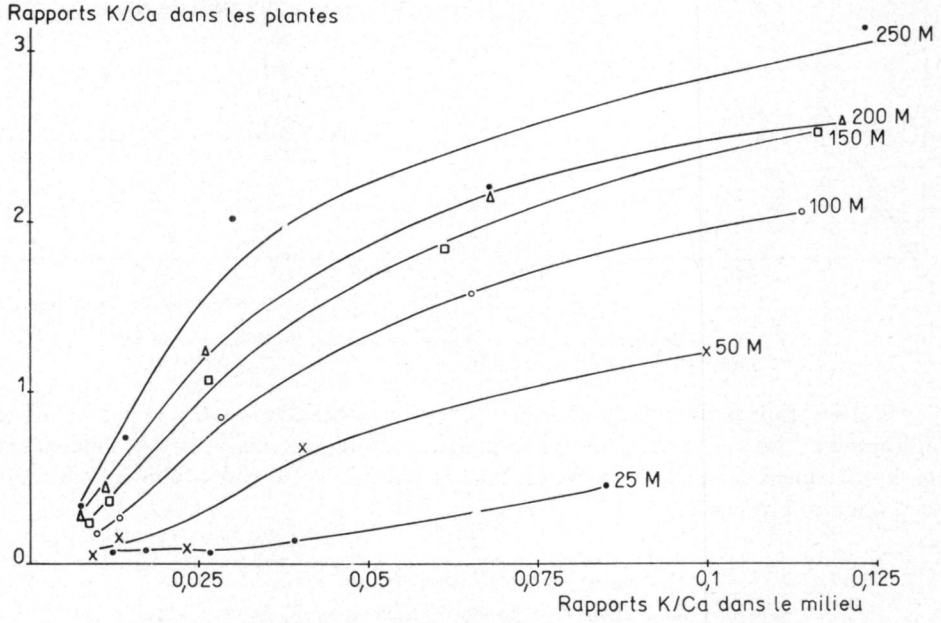
fonction des teneurs des sols en K échangeable, quels que soient les rapports K/T. Les courbes relatives aux divers milieux se fondent ici entre elles, indiquant que la richesse en K échangeable a essentiellement déterminé l'absorption du potassium. La même conclusion apparaît sur le graphique 3, où une représentation identique est appliquée aux trois espèces cultivées dans l'expérience II : l'influence du rapport K/T et de la capacité d'échange du sol est très faible ou nulle.

2° *Les rapports K/Ca et K/Mg de la plante sont principalement déterminés par la teneur en potassium du sol, et non par les rapports K/Ca et K/Mg du sol.*

L'antagonisme de K par rapport à Ca et Mg apparaît nettement (graphique 4) : l'augmentation de la teneur en K de la matière sèche des plantes se traduit par une



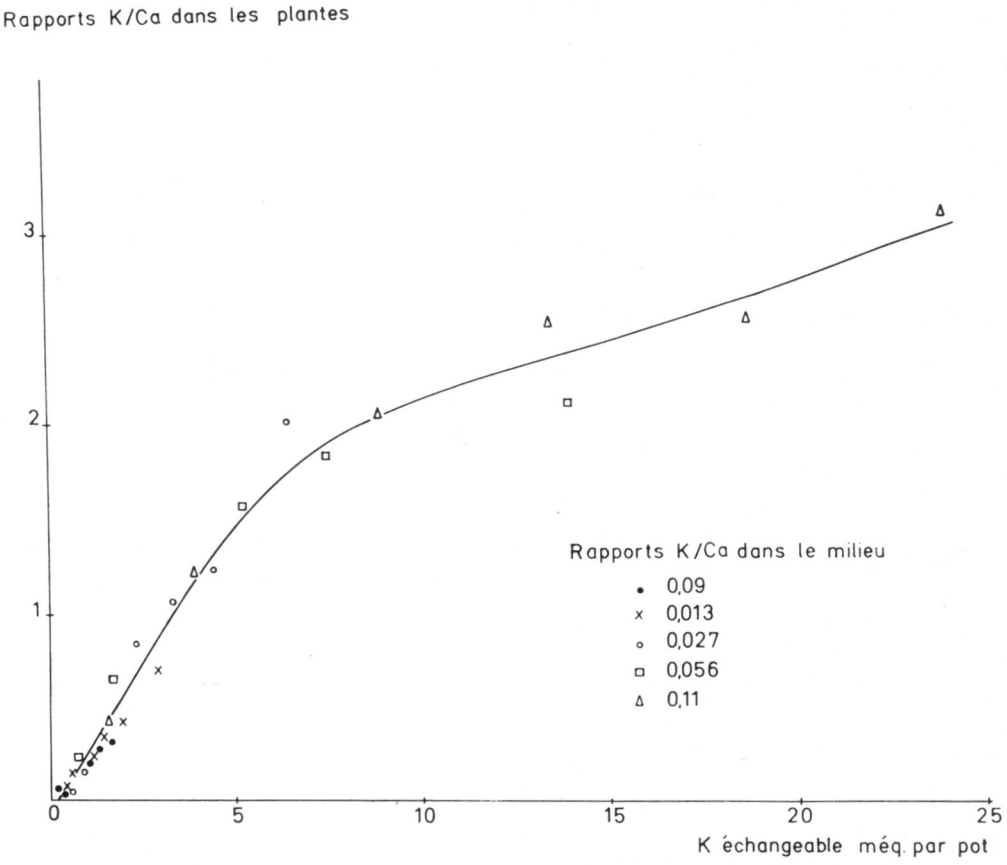
GRAPHIQUE 4. *Teneurs en cations % de matière sèche, en fonction des rapports K/T : antagonisme de K par rapport à Ca et Mg.*



GRAPHIQUE 5. *Rapports K/Ca dans les plantes en fonction des rapports K/Ca dans le milieu, à diverses capacités d'échange de cations.*

forte diminution des teneurs en Ca et Mg. L'effet inverse, cependant, ne se manifeste pas, ainsi que l'avait déjà observé BARBIER (1936) en solutions nutritives. Le graphique 5 montre en effet qu'à un même rapport K/Ca du milieu correspondent

dans la plante des rapports K/Ca extrêmement variables. Par contre, le graphique 6 indique que les rapports K/Ca de la plante sont essentiellement fonction de la teneur du sol en potassium échangeable ; quels que soient les rapports K/Ca dans le milieu, les points se groupent en effet autour d'une même courbe bien définie.



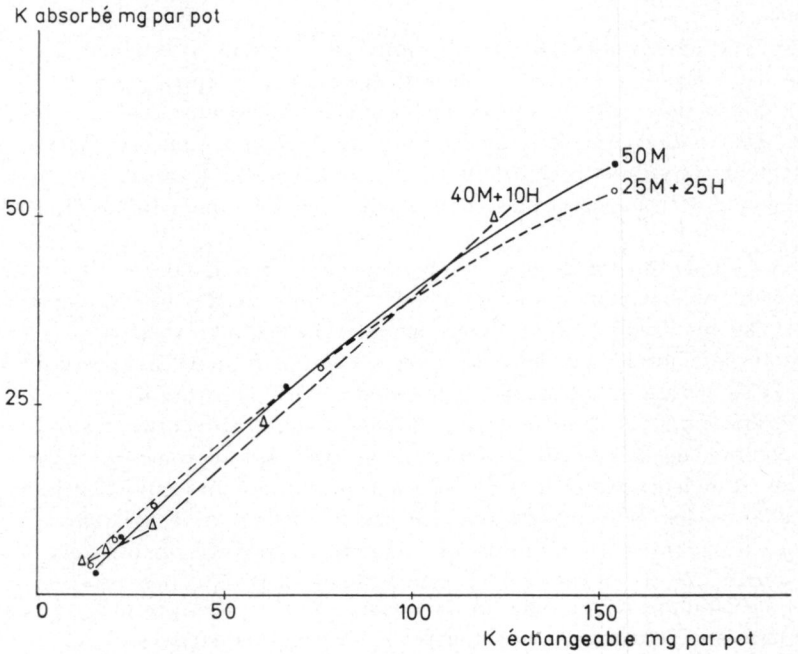
GRAPHIQUE 6. *Rapports K/Ca dans les plantes en fonction de la teneurs des sols en potassium échangeable, pour divers rapports K/Ca dans les milieux.*

L'absorption préférentielle des ions K^+ par rapport aux ions Ca^+ et Mg^+ est donc suffisamment intense pour que les rapports cationiques du milieu n'influencent pas notablement les mêmes rapports dans la plante ; cette conclusion rejoint celle du paragraphe précédent.

3° *La nature des colloïdes du sol utilisés n'a pas notablement influencé l'alimentation potassique.*

Le graphique 1 montre que les résultats obtenus sur les deux argiles, Kaolinite et Montmorillonite, sont identiques. Les surfaces internes de la Montmorillonite ont donc cédé les ions K^+ aux plantes aussi rapidement que les surfaces externes de la Kaolinite.

Dans les conditions réalisées ici, la présence d'humate calcique n'apporte pas non plus de perturbations marquantes à l'absorption du potassium (graphique 7). Les résultats seraient certainement différents si la quantité de potassium disponible dans le milieu ne limitait pas l'alimentation des plantes (CHAMINADE, 1955 ; BLANCHET, 1958).



GRAPHIQUE 7. *Quantités de potassium absorbées en fonction des teneurs en potassium échangeable, en présence de quantités croissantes d'humate calcique.*

4° *Une sorte d'équilibre de répartition du potassium échangeable entre la plante et le sol, indépendant du pouvoir adsorbant du sol, règle l'alimentation potassique.*

Le rôle prédominant de l'équilibre, du partage qui s'établit entre la plante et le sol dans l'alimentation potassique apparaît bien sur les graphiques 2 et 3 : les quantités de potassium absorbées par les plantes sont une fonction directe des réserves de K échangeable, quels que soient la teneur en argile du milieu, le rapport K/T, la concentration des solutions du sol... Tout se passe comme si les ions K^+ étaient absorbés selon une fonction de leur « densité » dans le milieu, quelle que soit la composition du sol et en particulier sa teneur en adsorbants (ceux-ci étant presque saturés par Ca^+ et Mg^+).

Ainsi, dans ces deux expériences, le partage s'effectue essentiellement en fonction de la quantité totale d'ions K^+ présents, la plante prélevant une certaine fraction de ceux-ci, et non en fonction du rapport entre le nombre total de sites susceptibles de retenir les ions K^+ sur le sol d'une part, le système radiculaire d'autre part. Lorsque le sol renferme 100 mg de K échangeable, l'alimentation des plantes est iden-

tique bien que la capacité d'échange du milieu varie de 25 à 250 méq par kg (graphique 2). Ces données ne doivent naturellement pas être extrapolées brutalement aux sols naturels, qui donnent presque toujours lieu à des rétrogradations d'intensité variable, surtout lorsqu'ils sont pauvres et argileux.

Bien que ces faits présentent un caractère paradoxal, ils ne paraissent cependant pas incompréhensibles. Dans ces essais, deux adsorbants antagonistes sont en présence :

— les systèmes radiculaires, possédant une capacité d'échange déterminée. Leur rôle d'adsorbant est fugace à l'égard des ions K^+ : après avoir été retenus à la surface des racines, ceux-ci sont rapidement absorbés et entraînés vers les parties aériennes, qui se développent d'autant plus que l'alimentation est meilleure, lorsque les facteurs physiques d'environnement ne sont pas limitants. Le système radiculaire se comporte beaucoup plus comme une « pompe » que comme un adsorbant statique.

— les colloïdes du sol, dont la proportion était variable dans les divers milieux, et qui étaient diversement pourvus en ions K^+, quoique à peu près uniformément saturés en autres cations. Nous avons montré (BLANCHET, 1959 *b*) que l'énergie d'adsorption des ions K^+ par le sol est très faible par rapport aux possibilités énergétiques de la plante, et ne limite certainement pas l'absorption.

En considérant ces deux données, on conçoit que l'alimentation soit une fonction du nombre, de la « densité » d'ions K^+ se trouvant au voisinage d'une surface radiculaire, et de leurs possibilités de diffusion, plutôt que du rapport entre les capacités d'échange des deux adsorbants. En raison du caractère *dynamique* de l'alimentation des plantes, ce rapport des capacités d'échange en présence n'a joué presque aucun rôle. Il en irait sans doute différemment dans des expériences où le caractère dynamique de l'alimentation serait atténué ou supprimé, par exemple dans des essais effectués en temps courts sur des racines excisées.

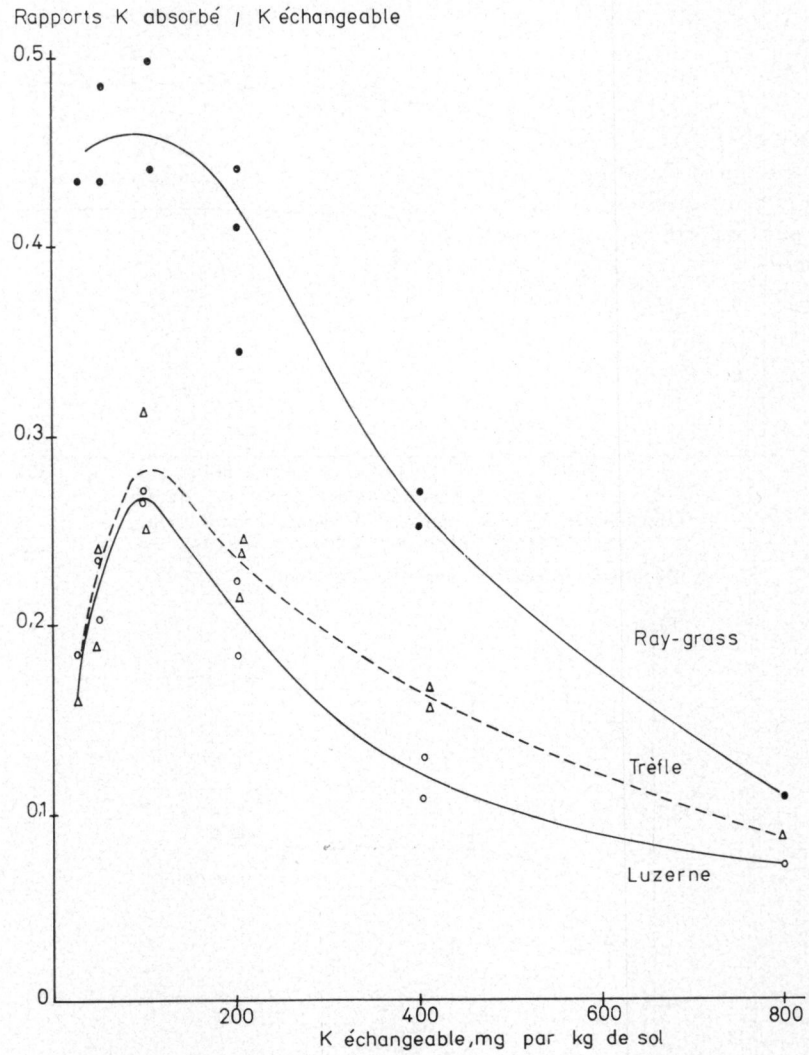
Ici, l'alimentation a été gouvernée par une donnée simple : le nombre d'ions K^+ échangeables se trouvant dans un « élément de volume » entourant une surface radiculaire donnée. Le degré d'exploration du sol par les racines apparaît ainsi comme une donnée essentielle, ce qui est bien conforme à l'expérience culturale (HENIN et al, 1960).

5° *Le rythme de l'utilisation par les plantes des réserves du sol est maximum pour une valeur moyenne de celles-ci ; il dépend beaucoup du développement et des propriétés des systèmes radiculaires.*

Nous avons déjà signalé ce phénomène à propos de l'expérience I (BLANCHET et al, 1961). Nous donnerons ici quelques exemples tirés de l'expérience II, où les conditions sont plus proches de celles que l'on rencontre en plein champ. Le graphique 8 représente, en fonction des réserves de potassium échangeable des sols, les fractions de ces réserves absorbées par les plantes avant la première coupe (c'est-à-dire les rapports K absorbé/K échangeable), pour les trois espèces cultivées. Il met en évidence les points suivants :

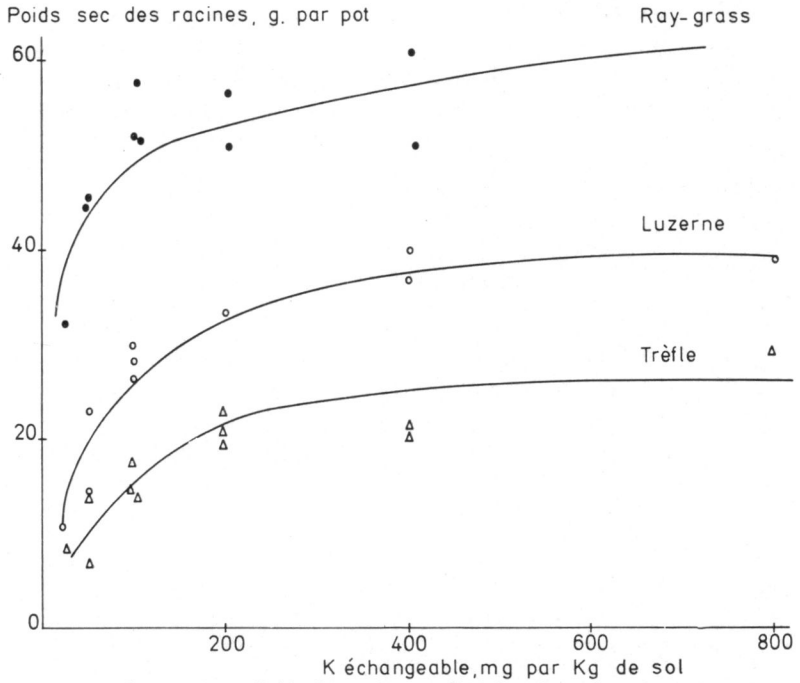
— Dans les sols les plus pauvres en potassium, les réserves potassiques ont été peu utilisées par la luzerne et le trèfle, qui possédaient des systèmes radiculaires

trop peu développés pour explorer suffisamment le milieu (graphique 9). Dans ces sols pauvres, il se produit donc une sorte de cercle vicieux : les réserves potassiques sont très faibles, et les plantes chétives ne peuvent développer suffisamment leurs racines pour exploiter convenablement ces réserves, pourtant très limitées.

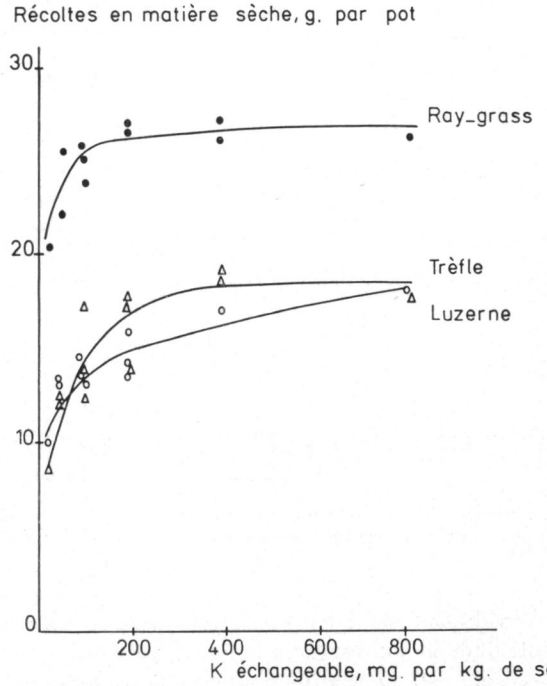


GRAPHIQUE 8. *Fractions des réserves potassiques absorbées avant la première coupe par les trois espèces, en fonction des teneurs en potassium échangeable.*

— La vitesse d'utilisation des réserves, c'est-à-dire la vitesse d'utilisation du capital engrais investi dans le sol, est maximum ici pour une teneur d'environ 100 à 150 mg K par kg de sol ; cela ne signifie d'ailleurs pas que ces réserves soient toujours suffisantes pour assurer la croissance maximum des plantes (graphique 10).



GRAPHIQUE 9. *Poids des systèmes radiculaires des trois espèces, en fonction des teneurs en potassium échangeable.*



GRAPHIQUE 10. *Récoltes en matière sèche des trois espèces* (1re *coupe*), *en fonction des teneurs en potassium échangeable.*

Ce maximum correspond plutôt à un développement correct du système radiculaire (graphiques 8 et 9).

— Ces phénomènes sont moins accentués pour le ray-grass d'Italie, qui arrive à développer en milieu pauvre un système radiculaire puissant (graphiques 8 et 9), et ainsi à bien utiliser les réserves.

— Dans les milieux riches, les réserves sont lentement utilisées car les facteurs physiques limitent la croissance des plantes, qui sont en quelque sorte « saturées » de potassium. Il peut apparaître une consommation de luxe, les rendements n'augmentant plus aux fortes teneurs en potassium du sol, bien que les quantités de potassium absorbées continuent à augmenter (graphiques 3 et 10). La consommation de luxe est particulièrement nette chez le ray-grass, mais n'apparaît guère chez la luzerne dans les conditions de l'expérience.

— Le comportement différent des trois espèces végétales étudiées s'explique par les propriétés de leurs systèmes radiculaires : dans ces essais, la capacité d'échange de cations de l'ensemble du système radiculaire, c'est-à-dire le nombre de « portes d'entrée » des ions K^+, était beaucoup plus élevé chez le ray-grass que chez les deux légumineuses. A titre d'exemple, nous indiquons dans le tableau 3 la capacité d'échange de cations de l'ensemble du système radiculaire des trois plantes cultivées dans les milieux renfermant 13 p. 100 d'argile.

TABLEAU 3

Capacités d'échange de cations de l'ensemble des systèmes radiculaires des trois espèces végétales (milieux renfermant 13 p. 100 d'argile).

Teneur en K du sol mg/kg	C. E. C. des systèmes radiculaires, méq par pot		
	Ray-grass	Trèfle	Luzerne
48,8	2,8	0,77	1,86
97,7	5,6	1,79	2,69
195	4,2	2,63	2,38
390	7,0	2,24	1,89
	Moyennes :		
	4,9	1,86	2,2

Bien que la capacité d'échange de cations des radicelles de légumineuses soit plus élevée que celle des radicelles de ray-grass, le chevelu très abondant de celui-ci représente pour l'ensemble de la plante une surface d'absorption des cations beaucoup plus grande. Ces résultats s'appliquent aux conditions expérimentales réalisées ici, où les trois espèces avaient à leur disposition des volumes de terre identiques ; dans des sols naturels profonds, le volume de terre exploité par ces mêmes espèces peut être très différent, et le rapport de leurs surfaces absorbantes est susceptible de varier également. Des observations culturales relatives à l'alimentation potassique concordent néanmoins avec les résultats rapportés ici (KERGUELEN, 1960).

Conclusions

Les principales conclusions de ces essais sont les suivantes :

1° Dans ces conditions, aussi proches que possible de celles des sols naturels ne présentant pas de rétrogradations et de régénérations, l'alimentation potassique est essentiellement fonction de trois facteurs :

— la quantité d'ions K^+ présents dans le milieu,

— le développement des systèmes radiculaires, et notamment de leurs surfaces absorbantes exprimées par la capacité d'échange de cations,

— les besoins alimentaires des plantes.

2° La présence dans le milieu de taux croissants d'argiles sensiblement saturées en ions Ca^+ et Mg^+ n'oppose pas une résistance marquée à l'absorption du potassium, à la condition, naturellement, que les phénomènes de rétrogradation soient éliminés. Il n'apparaît pas de différences appréciables dans la cession des ions K^+ par la Kaolinite et la Montmorillonite, contrairement à ce qui a été observé dans des expériences de courte durée avec racines excisées (Elgabaly et Wiklander, 1949).

3° L'absorption du potassium est étroitement liée aux besoins de la plante, comme nous l'avons déjà indiqué (Blanchet, 1959 *c*). « L'absorption préférencielle » de ce cation est suffisamment intense pour que les rapports K/Ca et K/Mg des plantes dépendent essentiellement de la teneur en K du milieu, et non des mêmes rapports existant dans celui-ci.

4° Les concentrations en potassium des solutions du sol, qui étaient fonction des rapports K/T, n'ont pas influencé notablement l'alimentation potassique ; il en est de même de l'énergie d'adsorption des ions K^+.

5° La grande querelle qui oppose partisans et adversaires de l'alimentation à partir de la solution du sol ou à partir de contacts entre les racines et les colloïdes du sol apparaît sans grand objet pratique lorsque l'on se place dans des conditions proches de celles qui existent dans la nature. En effet, ni la concentration de la solution du sol, ni la répartition des ions K^+ sur des surfaces adsorbantes dont l'étendue variait dans la proportion de 1 à 10, n'ont exercé d'effet appréciable.

6° Le partage des ions K^+ entre la plante et le sol dépend principalement du degré d'exploration de celui-ci par les racines, et du nombre d'ions K^+ présents dans un « élément de volume » entourant les radicelles. Ces deux données apparaissent comme les *facteurs limitants essentiels* de l'alimentation potassique, les autres facteurs envisagés n'étant que secondaires dans les conditions réalisées. Comme nous l'avons déjà montré (Blanchet, 1959 *b*), les aspects énergétiques, et les diverses interprétations thermodynamiques qui en ont été données (Lagerweff, 1960), ne jouent pas un rôle très important dans les milieux naturels.

7° En raison du caractère *dynamique* de l'alimentation, la valeur absolue de la capacité d'adsorption des ions K^+ par l'ensemble du système radiculaire exerce une influence prédominante, plutôt que le rapport entre les capacités d'échange respectives du milieu et des racines. L'aspect physiologique de l'alimentation potassique paraît dominer largement l'aspect physico-chimique.

B — QUELQUES ASPECTS DE L'ALIMENTATION POTASSIQUE EN PRÉSENCE D'ARGILES ILLITIQUES ALTÉRÉES

Nous désignons par « illites altérées » des argiles illitiques comportant des espaces interfoliaires ayant perdu une partie ou la totalité des ions K^+ qu'ils doivent normalement renfermer. Ces argiles sont désignées également par « illites ouvertes » (VAN DER MAREL, 1959 ; MORTLAND, 1958). Nous avons étudié quelques sols renfermant des illites altérées ; ils proviennent soit de divers champs d'essais d'engrais potassiques (STRASMAN et al, 1958 ; FRANC DE FERRIÈRE et al, 1960), soit de rendzines de Champagne Berrichonne dont les caractères généraux ont été exposés par ailleurs (BLANCHET, 1961 *b*).

1° LES SOLS ÉTUDIÉS

Nous rappelons dans le tableau 4 les principales caractéristiques intéressant la dynamique du potassium dans ces sols. La nature des argiles a été déterminée par le Laboratoire de Géologie de la Faculté des Sciences de Strasbourg, en collaboration avec la Société Commerciale des Potasses d'Alsace qui a bien voulu nous communiquer les résultats.

TABLEAU 4

Principaux caractères des sols sur lesquels ont été effectuées les études de mobilité des ions K.

N°	Désignation	Fixation K, méthode Van der Marel % de K apporté		K échangeable p. p. m. de sol	Argile %	Nature de l'argile						
		Humide	Sec			K	Ch.	M.	I.	V.	Q.	Int.
1	Pompignac	9,7	22,4	99	12,3		60		40		+	
2	Petit Bèle.....	12,7	26,1	89	14,5		60		40			
3	La Harpe.....	11,9	28,4	101	10,5		60		40			
4	Issoudun 13	15,5	28,8	320	37,5							
5	Vineuil 1	15,6	40	208	37,9	30			70			
6	Vineuil 2	14,6	43	158	27,3	40		10	50			
7	Lucay-le-Libre ...	16,9	40	230	30	20		10	70	tr.		
8	Ablis	16,2	44,5	157	17,5	10		20	70			
9	Lieusaint	17	43	125	16,7	20	10		70			
10	Toulouse	17,6	55,5	174	17,3		20		80			
11	Brion	21,9	48,3	160	24,4	30			70			
12	Paudy	23,1	48	265	40	30			70			tr.

K : Kaolinite ; Ch : Chlorite ; M : Montmorillonite ; I : Illite ; V : Vermiculite ; Q : Quartz $< 2\ \mu$; Int : interstratifiés.

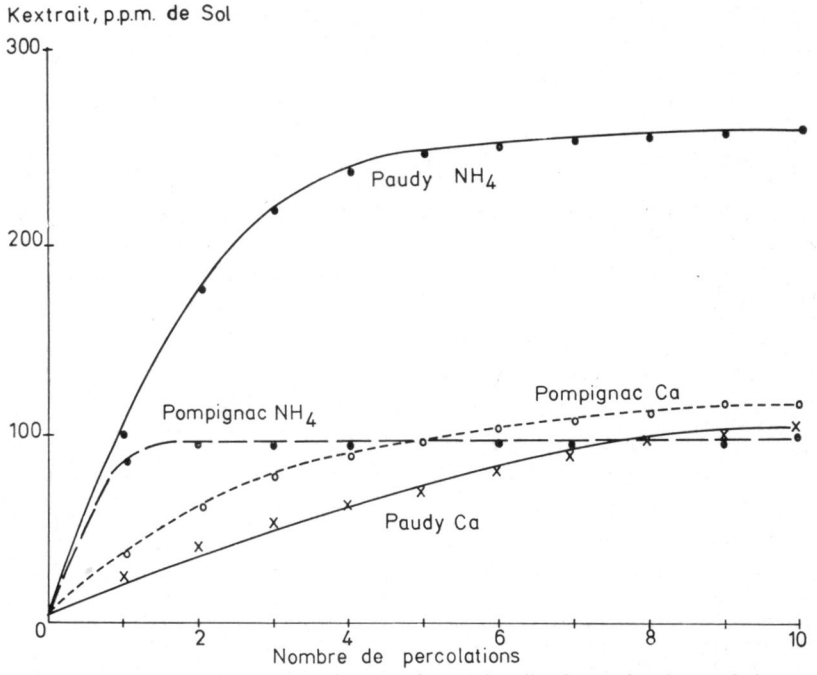
Ces sols sont classés selon l'intensité de leur fixation du potassium, appréciée par la technique de VAN DER MAREL (1955). Ils ont dans l'ensemble reçu des fumures potassiques régulières (parcelles K 1 ou K 2 des champs d'essais).

Nous envisagerons successivement la mobilité des ions K^+ retenus par ces sols, puis leur utilisation par les plantes.

2° Mobilité des ions K^+

a) *Réactions d'échange :*
Comparaison du déplacement des ions K^+ par les ions Ca^{++} et NH_4^+

Dans ces essais, 10 g de sol ont été mélangés à 10 g de quartz grossier et percolés sur filtre par fractions successives, recueillies séparément, de 25 ml d'acétates neutres de calcium ou d'ammonium. Le potassium déplacé était dosé dans dix percolats successifs par photométrie de flamme après élimination éventuelle de la plus grande partie de Ca par précipitation avec SO_4 $(NH_4)_2$.



Graphique 11. *Quantités de potassium extraites en fonction du nombre de percolations par les acétates de calcium et d'ammonium, sur deux sols différents.*

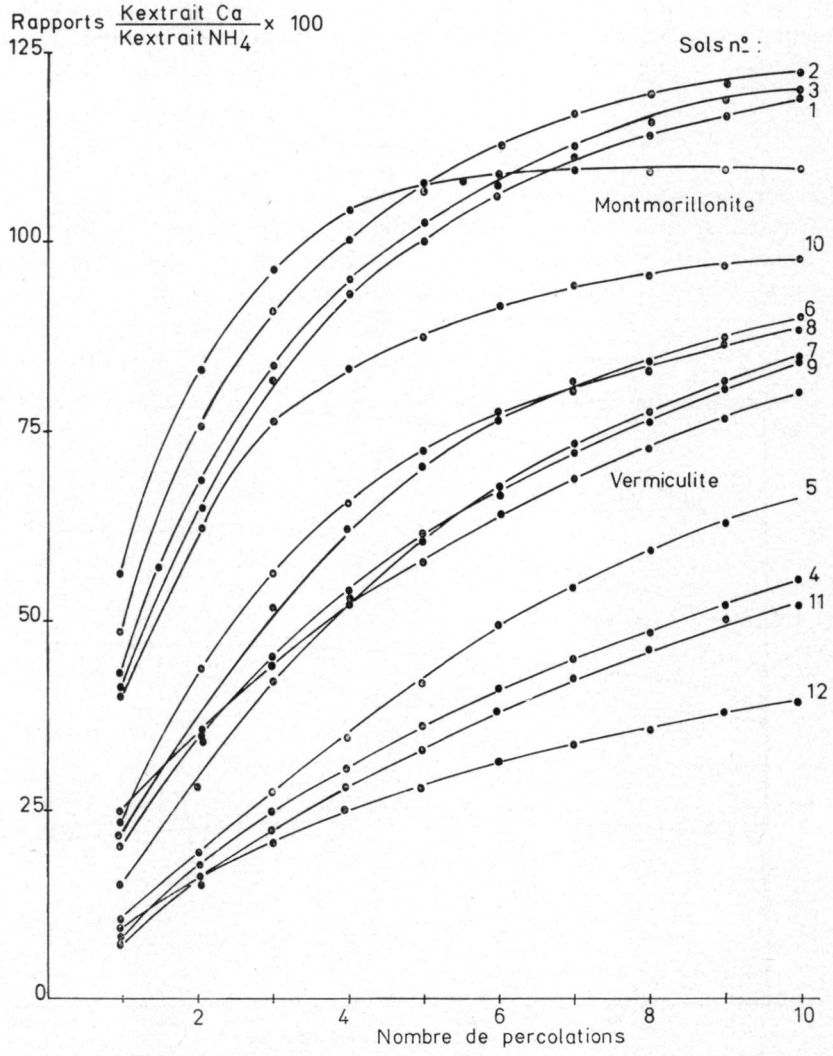
Le graphique 11 indique l'allure générale des résultats obtenus, d'une part sur un sol de faible pouvoir de rétrogradation, pauvre en argiles illitiques altérées (n° 1, Pompignac), d'autre part sur un sol riche en ces mêmes argiles (n° 12, Paudy). Les observations suivantes s'en dégagent :

— Dans les deux cas, le potassium est déplacé plus rapidement par les ions NH_4^+ que par les ions Ca^{++} ; cet effet peut être dû à la polarisabilité plus faible des ions Ca^{++}, et à leurs plus grandes dimensions (van der Marel, 1959).

— Cependant, l'écart est beaucoup plus grand dans le sol n° 12 que dans le sol n° 1.

— Enfin, les ions Ca^{++}déplacent dans le sol n° 1 autant et même un peu plus de potassium que les ions NH_4^+. Au contraire, dans le sol n° 12, le déplacement par Ca est considérablement plus faible que par NH_4. Ce sol riche en illites altérées est donc caractérisé par un échange très lent et très limité des ions K^+ contre les ions

Ca^{++}. Tout se passe comme si ces derniers étaient trop volumineux pour atteindre facilement des ions K^{+} se trouvant dans des espaces interfoliaires assez étroits, selon le processus d'altération mis en évidence chez la biotite par MORTLAND (1958).



GRAPHIQUE 12. *Rapports* $\frac{K \text{ extrait acétate } Ca}{K \text{ extrait acétate } NH_4} \times 100$ *en fonction du nombre de percolations, sur un ensemble de divers sols.*

Ce caractère est assez général dans les sols à illites altérées que nous avons étudiés, comme l'indique le graphique 12, qui représente en fonction du nombre de percolations les rapports $\frac{\text{K extrait par Ca}}{\text{K extrait par NH}_4}$. Le déplacement du potassium par

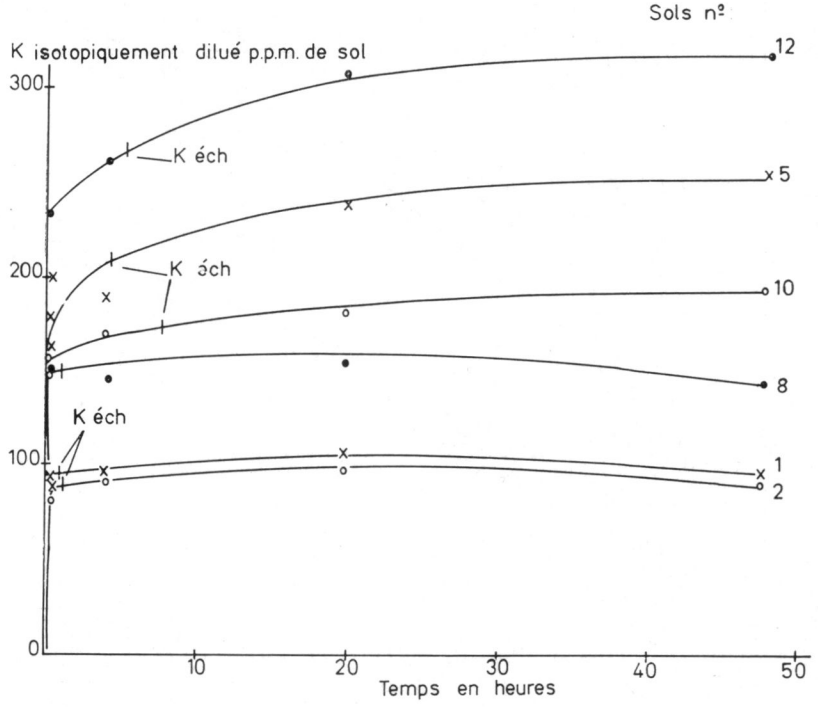
les ions Ca^{++} est dans l'ensemble d'autant plus lent et limité que le pouvoir de rétrogradation des sols est plus élevé (comparaison du graphique 12 et du tableau 4), bien qu'il apparaisse quelques exceptions, notamment celle du sol nº 10.

Les résultats obtenus sur une Montmorillonite pure ayant porté des cultures (expérience I ci-dessus) et sur un sol dont l'argile est presque exclusivement de la vermiculite montrent que ces phénomènes sont principalement imputables aux illites altérées, et non aux autres types d'argiles à réseaux expansibles.

b) *Dilutions isotopiques*

Le but de cette expérience était double :

— examiner avec quelle vitesse se diluent isotopiquement les ions K^+ lentement échangeables contre des ions Ca^{++}, mais facilement déplaçables par NH_4^+, de façon à estimer la mobilité propre de ces ions.



GRAPHIQUE 13. *Quantités de potassium isotopiquement diluées, en fonction du temps, dans un groupe de sols.*

— rechercher s'il existe dans la dilution isotopique une différence nette entre les ions K^+ échangeables contre NH_4^+ et les ions K^+ susceptibles d'être rapidement régénérés par les illites altérées (TENDILLE et al, 1956).

A cet effet, 125 g de divers sols ont été d'abord agités pendant 30 minutes dans 250 ml de solution de $CaCl_2$ O,1N. A un instant donné, on ajoutait 20 µc de

^{42}K sous forme de solution de $^{42}K_2CO_3$ (activité spécifique de l'ordre de 7 mc par gramme K au moment de l'expérience ; on apportait ainsi, par échantillon, 3 mgr ^{39}K, soit environ 25 p. p. m. de sol). Les suspensions étaient agitées énergiquement, et des fractions de celles-ci étaient filtrées rapidement au bout des temps suivants : 1, 4, 20 minutes ; 4, 20, 48 heures.

Le graphique 13 représente les résultats obtenus sur les sols les plus caractéristiques. Les quantités de potassium isotopiquement diluées sont portées en fonction du temps ; les teneurs en potassium échangeable obtenues au cours des percolations fractionnées par l'acétate d'ammonium sont indiquées sur le graphique.

Deux types de courbes apparaissent nettement : celles qui se rapportent aux sols nos 1, 2 et 8 indiquent une dilution isotopique très rapide, sensiblement achevée en une heure, et correspondant bien aux teneurs en K échangeable. Dans les sols nos 5, 10 et 12, par contre, la dilution isotopique qui a été également très rapide pendant les premières secondes se poursuit ensuite lentement et ne paraît pas terminée au bout de 48 heures. Les teneurs en potassium échangeable se situent dans une fraction nettement ascendante des courbes, et représentent les quantités de K isotopiquement diluées en quelques heures. Les sols qui ont présenté ce comportement sont riches en illites altérées, comme en témoignent leur fort pouvoir de fixation de K (tableau 4) et les quantités importantes de potassium régénéré qu'ils sont susceptibles de fournir aux plantes (voir ci-dessous). Cependant le sol no 8, qui possède des propriétés assez voisines, ne présente pas ces anomalies.

Ces résultats montrent que les ions K^+ lentement déplaçables par le calcium ont cependant une grande mobilité ; ils confirment ainsi l'hypothèse émise ci-dessus, selon laquelle la lenteur de leur échange contre Ca^{++} serait surtout due à des facteurs stériques. Ils font en outre ressortir l'absence de limite nette, chez les illites altérées, entre le potassium échangeable et le potassium emprisonné dans les espaces interfoliaires. La définition du potassium échangeable apparaît donc dans ces cas assez floue, et surtout fonction des modalités de l'extraction.

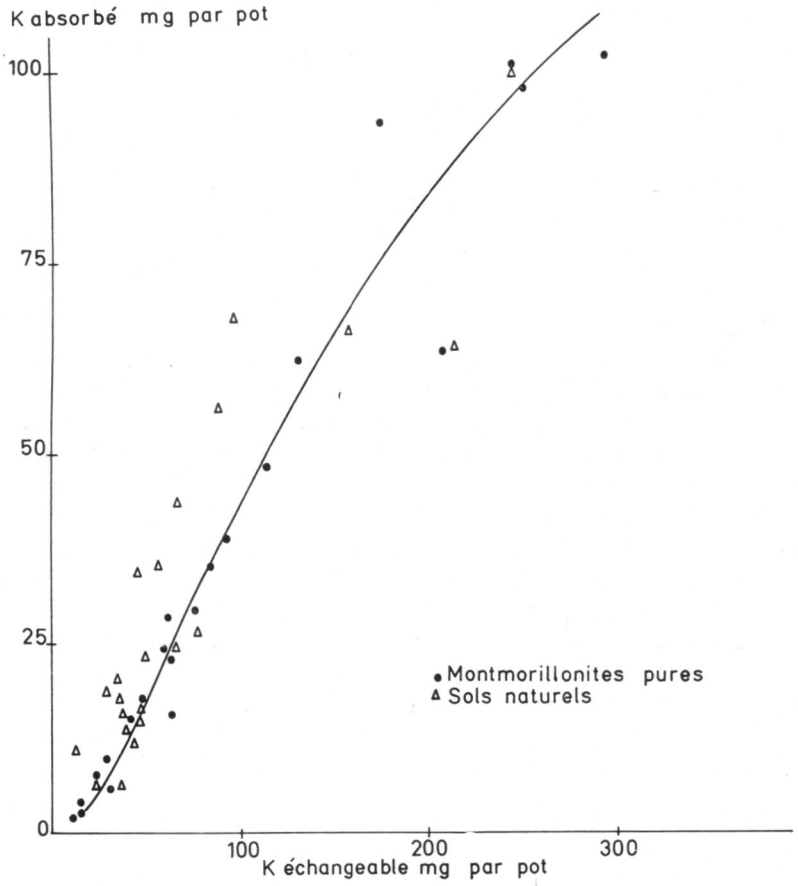
3° ÉPUISEMENT PAR DES CULTURES ET RÉGÉNÉRATION DU POTASSIUM ÉCHANGEABLE

Nous avons indiqué que l'expérience I décrite dans la première partie de ce mémoire comprenait, outre les milieux synthétiques, une série de sols naturels et notamment la plupart de ceux qui figurent sur le tableau 4. Les principaux résultats obtenus au cours de l'épuisement de ces sols naturels sont les suivants :

a) L'alimentation potassique a été fonction de la teneur des sols en K échangeable, selon la même relation que dans les milieux synthétiques (graphique 14). Les difficultés d'échange entre les ions K^+ et Ca^{++} dans les illites altérées, signalées ci-dessus, n'ont donc pas gêné sensiblement l'absorption du potassium par les plantes. Dans la mesure où elle peut limiter l'alimentation, la diffusion des ions K^+ doit ainsi être envisagée soit en tant que mobilité propre (résultats de la dilution isotopique), soit en tant que rapidité d'échange avec des ions H^+ excrétés par les racines (ARNOLD, 1958), plutôt que sous l'angle des échanges K^+ — Ca^{++}.

b) L'identité de la relation K échangeable — K absorbé obtenue d'une part sur les sols naturels, et d'autre part sur les milieux synthétiques dont les réserves potassiques étaient exactement connues, permet d'évaluer, aux diverses coupes successives du ray-grass, la teneur en K échangeable des sols dans lesquels des régénérations

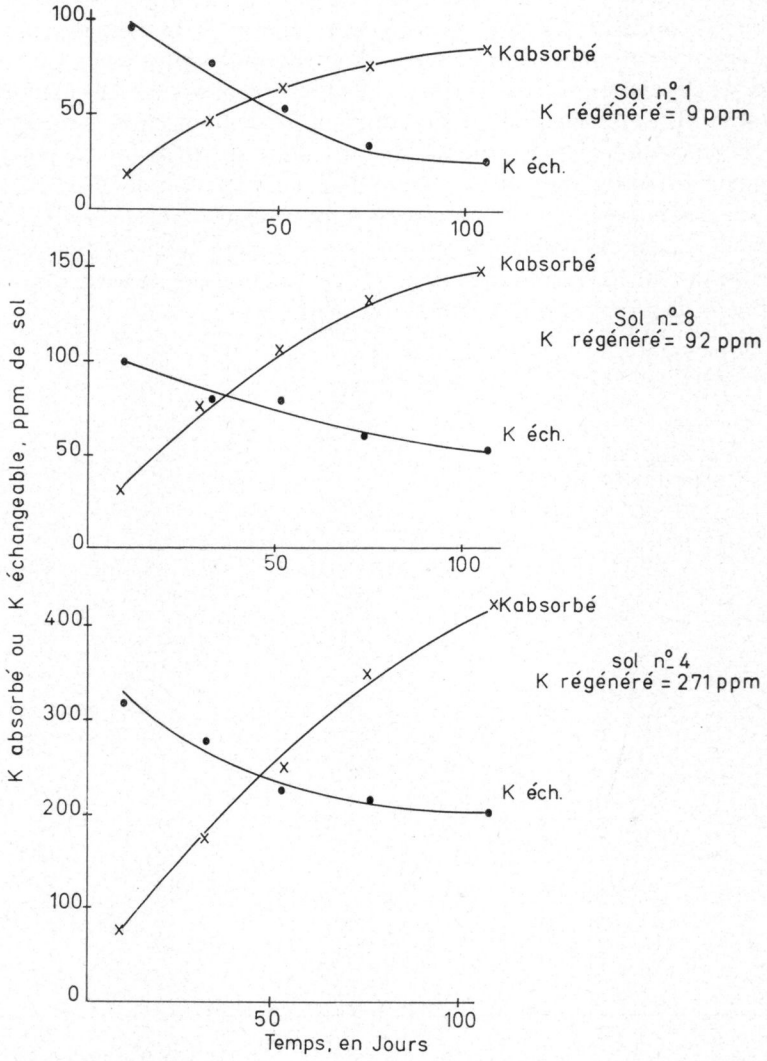
sont intervenues. On peut ainsi comparer l'absorption du potassium par les plantes et l'évolution des réserves échangeables du sol entre le départ et la fin de la culture (pour plus de sécurité, le dosage de K échangeable a été effectué après la dernière récolte).



GRAPHIQUE 14. *Quantités de potassium absorbées en fonction des teneurs en potassium échangeable, dans des sols synthétiques ou naturels.*

Le graphique 15 représente les résultats obtenus sur trois sols caractéristiques. Le sol nº 1 (voir tableau 4) a donné lieu a très peu de régénérations ; les deux courbes représentant respectivement le K absorbé et les teneurs en K échangeable sont sensiblement symétriques : au fur et à mesure que celles-ci s'abaissent, la vitesse d'absorption diminue. Dans le sol nº 4, au contraire, où les régénérations ont été considérables, la teneur en K échangeable s'abaisse d'abord assez rapidement, puis beaucoup plus lentement et garde une valeur élevée (200 p. p. m.). Les plantes ont cependant absorbé à une vitesse sensiblement constante une quantité de potassium largement supérieure à la réserve échangeable initiale. Le sol nº 8, enfin, présente un comportement intermédiaire : l'alimentation des plantes se ralentit au fur et à mesure

de la diminution régulière des réserves échangeables (ce sol nº 8 a été moins enrichi par les apports d'engrais que l'échantillon décrit dans le tableau 4 ; la nature de l'argile est cependant identique).

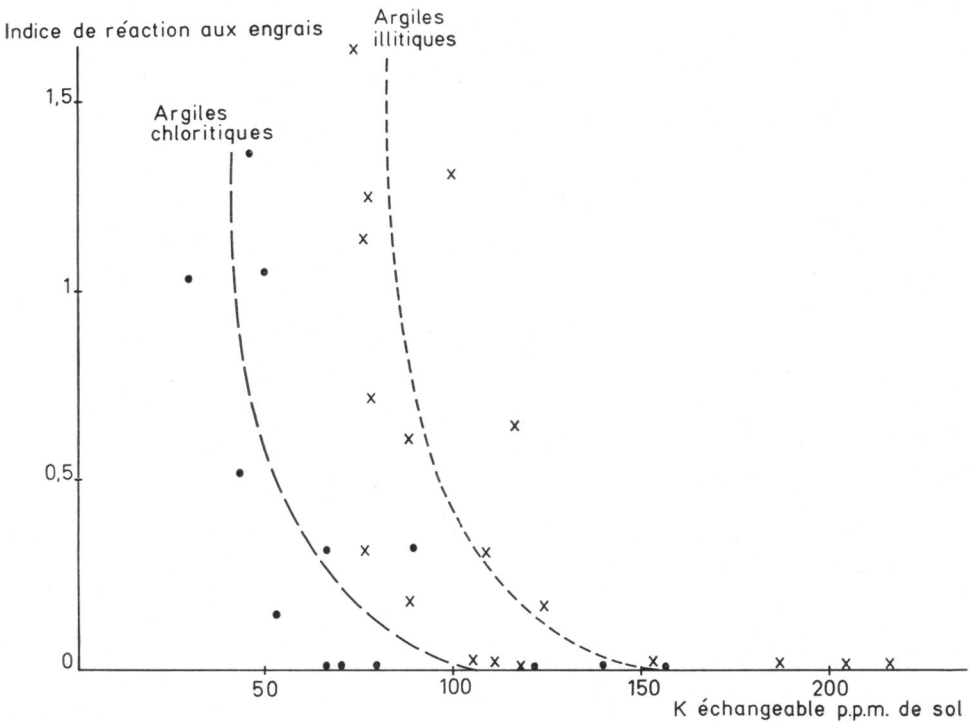


GRAPHIQUE 15. *Quantités de potassium absorbées et teneurs en potassium échangeable, en fonction du temps, dans trois sols différents (potassium absorbé et potassium échangeable sont exprimés en mêmes unités : p. p. m. de sol).*

Ainsi, l'alimentation potassique des plantes en présence de ces illites altérées est réglée par la rapidité de la diffusion des ions K^+ interfoliaires vers l'état échangeable. La vitesse de cette diffusion peut dépendre de la nature des minéraux argileux, et des apports antérieurs éventuels d'engrais potassiques (ELLIS et MORTLAND, 1959 ; GARAUDEAUX et al, 1956).

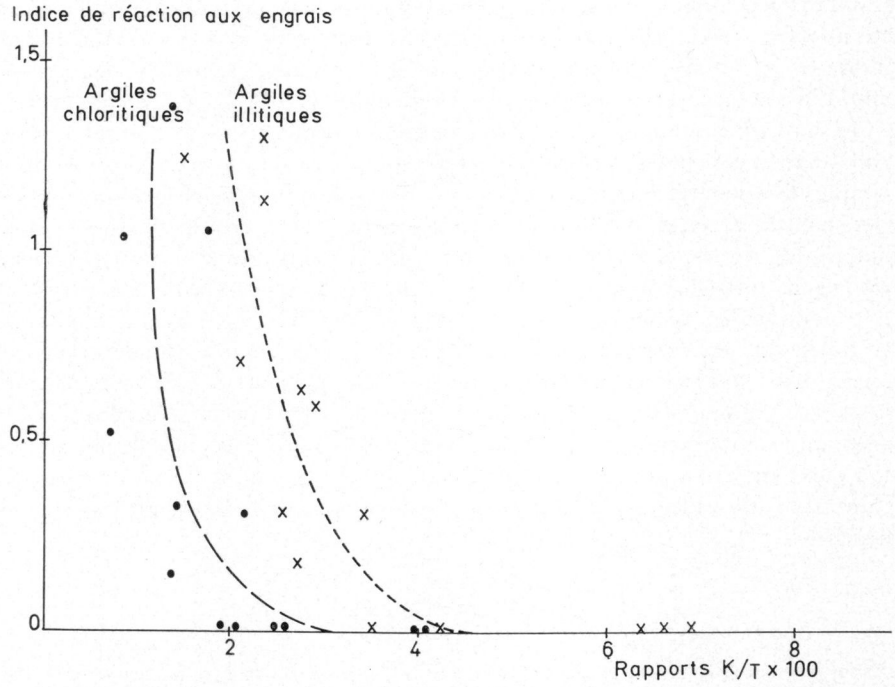
4° ARGILES ILLITIQUES ET RÉACTION DES CULTURES AUX APPORTS D'ENGRAIS POTASSIQUES

Par leurs facultés de rétrogradation et de régénération, les argiles illitiques exercent une sorte d'effet tampon sur la dynamique du potassium dans le sol et l'alimentation des plantes (BARBIER et al, 1957). Les réponses aux apports d'engrais potassiques peuvent ainsi présenter des caractères très différents selon la présence plus ou moins abondante de ces argiles. A titre de complément aux résultats publiés précédemment (STRASMAN et al, 1958 ; FRANC de FERRIÈRE et al, 1960), nous indiquons ici les réactions aux engrais observées sur pommes de terre dans un groupe de champs d'essais, en distinguant les sols à argiles chloritiques dominantes et les sols à argiles illitiques dominantes. Les indices de réaction représentent l'augmentation relative de rendement obtenue par kg de potassium apporté, sur une période de six ans. Ces indices sont représentés sur les graphiques 16 et 17, en fonction des teneurs des sols en K échangeable et des rapports K/T, respectivement.



GRAPHIQUE 16. *Indices de raction de la pomme de terre aux apports d'engrais potassiques, en fonction des teneurs des sols en potassium échangeable, pour deux groupes de sols à argiles différentes.*

On constate que, dans les deux modes de représentation, les deux groupes de sols se différencient très nettement. Des réactions comparables aux apports d'engrais se manifestent à des niveaux de réserves beaucoup plus élevés dans les sols illitiques que dans les sols chloritiques. Ce fait est très probablement dû aux rétrogradations qui interviennent en présence d'illites, et qui sont d'autant plus marquées que le rapport K/T est plus faible (CHAMINADE, 1936).



GRAPHIQUE 17. *Indices de réaction de la pomme de terre aux apports d'engrais potassiques, en fonction des rapports K/T de deux groupes de sols à argiles différentes.*

CONCLUSIONS GÉNÉRALES

Nous avons vu que, dans les sols sans doute relativement rares où il n'intervient pas de rétrogradations et de régénérations de potassium, l'alimentation potassique des plantes est réglée essentiellement par trois facteurs : la quantité d'ions K^+ échangeables présents dans le milieu, le développement des systèmes radiculaires, et les besoins alimentaires des végétaux. Les propriétés physico-chimiques du sol, telles que l'énergie d'adsorption, la capacité d'échange du milieu, la nature des colloïdes, l'activité des ions K^+, ne jouent qu'un rôle très secondaire lorsque les conditions expérimentales se rapprochent le plus possible de celles qui sont réalisées dans la nature.

Dans les sols certainement très répandus renfermant des argiles illitiques plus ou moins altérées, les mêmes facteurs gouvernent à un instant donné l'alimentation potassique, comme en témoigne la concordance des résultats obtenus en un temps relativement court sur des sols naturels et les milieux synthétiques (graphique 13). La mobilité des ions K^+ pouvant être considérés comme échangeables paraît toujours largement suffisante, dans les sols étudiés ici, pour ne pas limiter l'alimentation.

Celle-ci est principalement gouvernée par l'ampleur et la vitesse des phénomènes de rétrogradation et de régénération. Cette ampleur et cette vitesse paraissent dépendre de nombreux facteurs : teneur en argiles et nature de celles-ci, histoire cultu-

rale, conditions climatiques....Si, en première approximation, on peut admettre qu'il existe un certain équilibre entre le potassium échangeable et le potassium fixé, cet équilibre et la rapidité de sa réalisation varient fortement selon les sols. Ce vaste champ d'investigations ne paraît encore guère exploré.

Ces caractères seraient cependant essentiels à connaître pour bien apprécier le niveau des réserves potassiques des sols, et prévoir leur réaction aux apports d'engrais. Le simple classement d'un groupe de sols en deux catégories, selon la nature de leurs argiles, montre en effet que la réponse aux engrais varie considérablement selon le caractère des argiles. L'examen du rapport K/T constitue une utile précaution. Il serait très avantageusement complété par des tests simples relatifs aux possibilités de régénération et de rétrogradation (VAN DER MAREL, 1955). Si un rapport K/T élevé représente en effet certainement la garantie d'une bonne alimentation, cette condition n'est pas partout nécessaire, comme l'indiquent les sols chloritiques représentés sur le graphique 16. En présence d'argiles non illitiques, la constitution d'une réserve importante de potassium échangeable n'est souvent pas nécessaire, à la condition que l'entretien annuel soit bien assuré et que le niveau permette une bonne implantation des cultures, en particulier le développement abondant des systèmes radiculaires.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier la Société Commerciale des Potasses d'Alsace, en particulier MM. FRANC DE FERRIÈRE et QUIDET, des résultats et échantillons qu'ils ont bien voulu mettre à notre disposition.

Reçu pour publication en mars 1962.

SUMMARY

THE PHYSICO-CHEMICAL PROPERTIES OF SOILS AND THE POTASSIUM NUTRITION OF PLANTS

The potassium nutrition of plants, in absence of processes of retrogradation and regeneration, was studied on synthetic soils of well-known composition, at increasing exchange-capacities and variable amounts of exchangeable K-ions. Three different vegetal species were grown for a period of several months, and the main conclusions are the following :

1. The potassium nutrition essentially depends on three factors : the amount of exchangeable K-ions in the medium, the size of absorbing surface of the root system, and the requirements of the plant. The K-ions are somehow shared between the plant and soil, depending greatly on the exploration of the soil by roots.

2. Increasing amounts of colloids in the soil, and the nature of the colloid, have little effect on potassium nutrition. The absorption of potassium did not decrease in presence of increasing amounts of cations in the medium, and variations in the energy of adsorption, concentration of the soil solution and ratios of K^+/C. E. C. had no appreciable effects.

3. Due to the dynamic nature of nutrition, physiological factors play a much greater role than physico-chemical factors do. Under the near-natural conditions of the experiment, there was little difference between nutrition from the soil solution and by contact of the roots with soil particles. Energy values are only secondary factors.

The same conclusions are valid, for short periods, for the nutrition in presence of altered illites. For long periods, however, the essential characteristics are the extent and rate of retrogradations and regenerations. Isotopic dilution and absorption of potassium by plants show that the mobility of exchangeable K-ions fixed by altered illites is sufficiently high not to interfere with the nutrition, even though the exchange with Ca is slow and limited. Some examples are given showing the response to fertilizers according to the nature of the clays.

ZUSAMMENFASSUNG

PHYSIKALISCHE UND CHEMISCHE EIGENSCHAFTEN DER BÖDEN UND KALI-AUFNAHME DURCH DIE PFLANZEN

Die Untersunchung der Faktoren der Kali-Aufnahme durch die Pflanzen, in Abwesenheit von Festlegungs- und Renegerierungserscheinungen wurde auf synthetischem Boden mit genau bestimmter Zusammensetzung, mit steigendem Austauschvermögen, das verschiedene Mengen austauschbarer K^+- Ionen enthielt, durchgeführt. Drei verschiedene Pflanzen wurden mehrere Monate hindurch kultiviert. Hier die wichtigsten Schlussfolgerungen :

1° Die Kali-Aufnahme ist hauptsächlich durch drei Faktoren bedingt : die Menge austauschbarer K^+-Ionen, die sich im Milieu befinden, die Grösse der Wurzelabsorbtionsflächen, und die Nährstoffbedürfnisse der Pflanzen. Es geschieht eine Art Trennung der K^+- Ionen zwischen Pflanzen und Boden, die besonders vom Grade der Bodenexploration durch die Wurzeln abhängig ist.

2° Der steigende Gehalt an Bodenkolloiden und die Art derselben zeigten keinen besonderen Einfluss auf die Kali-Aufnahme. Die Kali-Absorbtion nimmt keineswegs durch steigende Mengen andrer Kationen im Milieu ab. Die Schwankungen der Adsorbtionsenergie, die Konzentrationen der Bodenlösungen und der Verhältnisse K^+/C. E. C haben keinen nennenswerten Einfluss.

3° Infolge des dynamischen Charakters der Ernährung spielen die physiologischen Faktoren eine viel grössere Rolle als die physikalischen und chemischen. In den hier erzeugten Bedingungen, die denjenigen des natürlichen Milieus nahekommen, ist der Streit zwischen Ernährung aus der Bodenlösung oder durch Kontakt der Wurzeln mit den Bodenteilchen ohne grosse Bedeutung. Die energetischen Daten sind ganz zweitrangige Faktoren.

Die gleichen Schulssfolgerungen finden, für kurze Zeit, auf die Ernährung im Beisein von verwitterten Illiten, Anwendung. Für längere Perioden hingegen sind Grösse und Geschwindigkeitder Festlegung und der Regeneration die hauptsächlichen Merkmale. Die isotopische Verdünnung und die Kali-Absorbtion durch die Pflanzen zeigt, dass die Beweglichkeit der durch verwitterte Illiten zurückgehaltenen austauschbaren K^+-Ionen genügt, um die Ernährung nicht zu stören, obwohl der Austausch mit Ca^{2+} langsam und begrenzt ist. Es werden einige Beispiele unterschiedlicher Reaktion gegenüber Düngergaben auf verschiedene Tonböden angeführt.

Физико-химические свойства почв и калиевое питание растений.

Р. БЛАНШЕ, Р. СТЮДЕР и Колетта ШОМОН (Шатору).

Изучение факторов калиевого питания растений, при отсутствии феноменов ретроградации и возстановления, было проведено на синтетических почвах точно известного состава, с увеличивавшейся емкостью обмена ионами и содержавших различные количества обменных ионов K^+. Три различных вида растений культивировались на этих почвах в течении нескольких месяцев. Оно привело к следующим главнейшим выводам :

1. Калиевое питание растений зависит главным образом от трех условий : количества обменных ионов K^+ среды, размеров поглотительной площади корневой системы и питательных нужд самого растения. Происходит нечто вроде дележа ионов K^+ между растением и почвой; это распределение зависит во многом от степени проникновения корней вглубь почвы.

2. Увеличение содержания коллоидов в почве и природа этих коллоидов не оказали сколько-нибудь значительного влияния на калиевое питание. Поглощение калия растениями не уменьшалось также от присутствия в среде увеличивавшихся количеств иных катионов. Изменения адсорбционной энергии, концентраций почвенных растворов и соотношения K^+ емкость обмена катионами — также не оказали чувствительного действия.

3. В виду динамического характера калиевого питания факторы физиологические сыграли более крупную роль чем факторы физико-химические. В условиях опыта близких к природной среде борьба между

питанием исходя от почвенного раствора и питанием поступающим от соприкосновения корней с мелкими частицами почвы — не играла никакой роли. Энергетические данные являлись второстепенными факторами.

Калиевое питание в присутствии выветренных иллитов привело к тем-же выводам, в течении более коротких промежутков времени.

Однако, основными характеристиками для периодов более долгих являются размеры и быстрота ретроградаций и возстановлений. Изотопическое разбавление и поглощение калия растениями доказали что обменные ионы K^+ удержанные иллитами достаточно подвижны чтобы не затруднять питание, несмотря на то что обмен с Ca^{++} протекает медленно и весьма ограничен. Приводятся несколько примеров реакций на подкормки удобрениями в зависимости от качества глин.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ANTONIANI C., 1955. La liberazione del potassio. In *Potassium Symposium*, 145-156, Institut International de la Potasse, Berne.

ARNOLD P. W., 1958. Potassium uptake by cation exchange resins from soils and minerals. *Nature*, **6**, 1594-1595.

BARBIER G., 1936. Contribution à l'étude de la nutrition minérale de la plante en fonction de la composition chimique du milieu. *Ann. agron.*, **4**, 568-586.

BARBIER G., TENDILLE C., TROCME S., 1957. Expérience culturale de onze années sur la fumure potassique. *C. R. Acad. Agric.*, **43**, 256-261.

BLANC-AICARD D., 1955. Études préliminaires sur l'adsorption radiculaire des cations. *Ann. agron.*, **6**, 615-633.

BLANCHET R., 1958. Actions directes et indirectes de la matière organique humifiée sur la nutrition des végétaux vasculaires. *Ann. agron.*, **10**, 499-532.

BLANCHET R., 1959 *a*. Énergie d'adsorption de divers ions par des argiles pures. *Ann. agron.*, **10**, 5.-32.

BLANCHET R., 1959 *b*. Nutrition minérale des plantes, activités ioniques et énergies d'adsorption. *Ann. agron.*, **10**, 267-307.

BLANCHET R., 1959 *c*. Comparaison de l'alimentation minérale des plantes dans les solutions nutritives et dans les sols cultivés. *Année Biol.*, **35**, 127-150.

BLANCHET R., 1961 *a*. Influence de l'ampleur et de la disponibilité des réserves minérales des sols sur la vitesse d'utilisation de ces réserves par les plantes. *C. R. Acad. Sci.*, **252**, 2597-2599.

BLANCHET R., 1961 *b*. Les sols et les problèmes agronomiques de Champagne Berrichonne. *Bull. Ass. Fr. Et. Sol*, **3**, 115-129.

CHAMINADE R., 1936. La rétrogradation du potassium dans les sols. *Ann. agron.*, **6**, 818-830.

CHAMINADE R., 1946. Sur une méthode de dosage de l'humus dans les sols. *Ann. agron.*, **2**, 119-133.

CHAMINADE R., 1953. Le potassium dans le sol. *Bull. Techn. Inform. Ing. Serv. agric.*, **81**, 535-538.

CHAMINADE R., 1955. Le potassium et la matière organique. In *Potassium Symposium*, 203-214, Institut International de la Potasse, Berne.

CHAMINADE R., 1960. Expérimentation en petits vases de végétation. *Ann. agron.*, **11**, 121-134.

ELGABALY M. M., WIKLANDER L., 1949. Effect of exchange capacity of clay minerals and acidoid content of plant on uptake of sodium and calcium by excised barley and pea roots. *Soil Sci.*, **67**, 419-424.

ELLIS B. G., MORTLAND M. M., 1959. Rate of potassium release from fixed and native forms. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **23**, 451-453.

FRANC DE FERRIÈRE J. J., 1960. *Minéralogie des argiles de quelques sols de France*, 1-19, Société Commerciale des Potasses d'Alsace, Mulhouse.

FRANC DE FERRIÈRE J. J., BLANCHET R., MILLOT G., CAMEZ T., 1960. Influence de la nature des argiles sur la dynamique du potassium dans les sols de quelques champs d'essais. *Ann. agron.*, **11**, 163-175.

GARAUDEAUX J., BARRY L., QUIDET P., 1956. Etude sur la dynamique de la potasse des sols par microcultures successives de ray-grass d'Italie. *C. R. 6e Congr. Int. Sci. Sol*, Paris, vol D, 131-144.

HENIN S., FEODOROFF A., GRAS R., MONNIER G., 1960. *Le profil cultural*, 143-162, Société d'Édition des Ingénieurs Agricoles, Paris.

JENNY H., 1953. In Truog E. *Mineral Nutrition of Plants*, 107-132, Univ. Wisconsin Press.

KERGUELEN M., 1960. Quelques aspects de la fertilisation des prairies temporaires. *Fourrages*, **3**, 50-89.

LAGERWERFF J. V., 1960. The contact-exchange theory amended. *Plant and Soil*, **13**, 253-264.

MORTLAND M. M., 1958. Kinetics of potassium release from biotite. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **22**, 503-508.

MORTLAND M. M., 1961. The dynamic character of potassium release and fixation. *Soil Sci.*, **91**, 11-13,

SCHUFFELEN A. C., VAN DER MAREL H. W., 1955. Potassium fixation in soils. In *Potassium Symposium*. 157-201, Institut International de la Potasse, Berne.

STEINBERG M., 1961. Etude minéralogique de la fraction argileuse des sédiments cénomaniens du nord du détroit poitevin. *C. R. Acad. Sci.*, **253**, 1826-1828.

STRASMAN A., QUIDET P., BLANCHET R., 1958. Dynamique du potassium dans le sol et alimentation potassique des plantes. *Ann. agron.*, **10**, 635-658.

TENDILLE C., GRENIER DE RUÈRE J., BARBIER G., 1956. Échanges isotopiques du potassium peu mobile des sols. *C. R. Acad. Sci.*, **243**, 87-89.

VAN DER MAREL H. W., VENEKAMP J. I. N., 1955. Potassium fixation in the dutch soils. *Versl. Landbouwk. Onderzoehn.*, **61**, 1-61.

VAN DER MAREL H. W., 1959. Potassium fixation, a beneficial soil characteristic for crop production. *Zeit. Pfl. Ernähr. Düng*, **84**, 51-62.

WALKER T. W., 1960. Uptake of ions by plants growing in soils. *Soil Sci.*, **89**, 328-332.

Ann. agron., 1962, **13** (3), 203-219.

633. 2 : 581. 192. 1

VARIATIONS DE LA COMPOSITION MINÉRALE DE DIX VARIÉTÉS DE GRAMINÉES FOURRAGÈRES AU COURS D'UNE ANNÉE D'EXPLOITATION AU RYTHME PATURE

M. COPPENET et Janine CALVEZ
Station d'Agronomie, Quimper (Finistère).

SOMMAIRE

Dix variétés de graminées fourragères représentant sept espèces différentes, semées sur le même terrain, ont été exploitées pendant une année au rythme pâturage, grâce à des coupes à la faucille effectuées chaque fois que le stade correspondant à un passage des animaux était réalisé. Il s'agit d'un ray-grass italien (6 exploitations), d'un ray-grass hybride (6 exploitations), de deux ray-grass anglais (3 et 4 exploitations), de trois dactyles (5 exploitations), d'une fétuque des prés (4 exploitations), d'une fétuque élevée (5 exploitations) et d'une fléole (3 exploitations).

Sur la matière sèche de chacune des coupes, il a été dosé : N, P, Ca, K, Mg, Na, Cu et Mn.

L'examen des résultats analytiques permet de dégager quelques conclusions intéressantes dans les domaines suivants : différences spécifiques, variations en cours d'année, aspect zootechnique.

INTRODUCTION

En 1958, une collection de graminées fourragères a été semée au champ d'expériences de la Station d'Agronomie de Quimper, en liaison avec M. H. LEPAGE, Ingénieur au G. N. I. S. F. Cette collection comportait 26 variétés de 7 graminées différentes avec des parcelles élémentaires de 3 m² répétées deux fois. Malgré la dimension restreinte des parcelles et le fait que nous n'avions que deux répétitions, nous avons utilisé cet essai pour comparer entre eux les poids de matière sèche récoltés.

En 1959, nous avons effectué une coupe à foin de toutes les parcelles au début de la floraison puis, ultérieurement, une ou deux coupes au stade pâturage suivant les cas.

Au cours de l'année 1960, l'exploitation a été poursuivie uniquement sur un rythme pâture et ce sont les récoltes de dix variétés qui ont été systématiquement analysées, à chacune des coupes, dans le but d'apporter quelques informations supplémentaires au chapitre de la composition minérale de l'herbe.

M. J. HOURMANT, Ingénieur à la Chambre d'Agriculture du Finistère, nous a procuré en août 1961 des échantillons de graminées provenant d'un champ d'essai de l'École d'Agriculture du Nivot en Lopérec (Finistère), sur lesquels nous avons également effectué la minéralisation.

MATÉRIEL EXPÉRIMENTAL — PRODUCTION DE MATIÈRE SÈCHE

Le semis des graminées pures a été effectué le 23 mai 1958 dans un terrain léger, d'origine granitique, enrichi en chaux, acide phosphorique et potasse depuis de nombreuses années. L'analyse du sol, effectuée en décembre 1960, c'est-à-dire à la fin de l'année d'expérimentation, donne les caractéristiques suivantes :

Argile	13,5 %	pH (eau)	5,7
Limon	16,5-20,5 %	Perte au feu	54-61 ‰
Limon grossier	15-18 %	P_2O_5 citrique	0,30-0,45 ‰
Sable fin	12-13,4 %	K_2O échangeable	0,065-0,090 ‰
Sable grossier	24,7-30,8 %	CaO échangeable	2,35-2,63 ‰
Terre fine	69-76,5 %	MgO échangeable	0,20 ‰
		Na_2O échangeable	0,024 ‰
		Mn actif	44-63 p.p.m.
		Cu total	37,5-38 p.p.m.

Il s'agit donc d'une terre faiblement pourvue en éléments fins, à forte teneur en sables grossiers et en graviers de plus de 2 mm. Le dernier apport d'amendement calcaire date d'une quinzaine d'années ce qui explique un certain abaissement du pH mais la teneur en CaO échangeable est encore très bonne. La teneur en P_2O_5 assimilable est élevée mais la potasse échangeable s'est notablement abaissée à la suite des exportations occasionnées par les coupes d'herbe successives. MgO échangeable est bon, Na_2O échangeable est faible et au-dessous de la moyenne des terres finistériennes.

Le manganèse actif est largement suffisant, surtout avec un tel pH ; quant au cuivre, une teneur de 37 à 38 p.p.m. dénote un sol très bien pourvu.

Avant le semis des graminées on a apporté 60 unités P_2O_5 et 90 unités K_2O, puis en janvier 1960, avec la première dose d'azote, 60 unités P_2O_5 avec 60 unités K_2O.

L'engrais azoté était constitué par l'ammonitrate, aussi bien au semis qu'après chacune des exploitations. En 1959, en plus de la coupe à foin effectuée au début de la floraison pour chaque variété, nous avons obtenu une coupe au stade pâturage pour les ray-grass anglais, deux coupes pour les ray-grass italiens, les dactyles et les fétuques, pas de coupe pour les fléoles.

Au cours de l'année 1960, l'exploitation a été conduite exclusivement sur un rythme pâture, grâce à des coupes à la faucille de la totalité des parcelles, au moment jugé valable pour le passage des animaux, la première coupe étant faite lorsque l'ébauche d'épi se trouve à une hauteur de 8-10 cm dans la gaine. La longueur moyenne des feuilles au moment de leur récolte était généralement comprise entre 15 et 30 cm.

Le fractionnement de l'ammonitrate a été le suivant au cours de l'année :

R.-G. italien *Rina* et R-G. hybride *Io* :
40 + 60 + 25 + 25 + 25 + 25 + 40 = 240 unités.
R.-G. anglais *Primevère* :
40 + 40 + 25 + 40 + 40 = 185 unités.
R.-G. anglais *Melle pâture* :
40 + 40 + 40 + 40 = 160 unités.
Dactyles *Germinal* et *Floréal* :
60 + 60 + 25 + 40 + 40 = 225 unités.
Dactyle *Prairial* :
60 + 60 + 40 + 40 + 40 = 240 unités.
Fétuque des prés *Naïade* :
60 + 60 + 25 + 60 + = 205 unités.
Fétuque élevée *S-170* :
60 + 60 + 25 + 25 + 60 = 230 unités.
Fléole *Maintenon* :
60 + 25 + 25 + 60 = 170 unités.

TABLEAU I

Espèce	Variété	Poids de matière sèche récolté en tonnes/ha										
		Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Total
Ray-grass italien	*Rina*	1,89	*35 j*	1,98	*30 j*	1,28	*29 j*	0,86	*41 j*	1,34	*61 j*	x	*86 j*	1,34	8,69
Ray-grass hybride	*Io*	1,86	*35 j*	2,08	*30 j*	1,28	*29 j*	0,82	*41 j*	0,95	*61 j*	x	*86 j*	0,94	7,93
Ray-grass anglais	*Primevère*		2,0	*46 j*	1,51	*50 j*	x	*61 j*	1,38	*103 j*				0,94	5,83
Ray-grass anglais	*Melle-Pâture*			2,59	*67 j*	x	*61 j*	1,33	*103 j*					1,28	5,20
Dactyle	*Germinal*		1,84	*47 j*	1,32	*55 j*	2,10	*58 j*	1,51	*81 j*				0,66	7,43
"	*Floréal*		2,04	*46 j*	1,82	*46 j*	2,42	*58 j*	1,60	*81 j*				0,85	8,73
"	*Prairial*			3,37	*44 j*	2,28	*41 j*	2,66	*43 j*	1,72	*75 j*			1,22	11,25
Fétuque des prés	*Naïade*		2,93	*50 j*	2,45	*104 j*			2,84	*104 j*				0,82	9,04
Fétuque élevée	*S. 170*	2,78	*32 j*	2,85	*42 j*	2,08	*104 j*		4,42	*104 j*				1,43	13,56
Fléole	*Maintenon*			3,42	*49 j*	2,15	*58 j*	2,64							8,21

Le premier apport correspond à la formation des ébauches d'épis (Stade A), les apports ultérieurs suivent immédiatement chacune des coupes.

Pluviométrie de l'année. — L'année 1960 a été particulièrement pluvieuse puisqu'il est tombé sur le champ d'expérience 1 451 mm d'eau, là où la moyenne est d'environ 1 000 mm. La répartition de la pluie a été régulière, mis à part un mois de mai sec.

Janvier	139,6 mm	Juillet	89,2 mm
Février	122,5 —	Août	154,7 —
Mars	151,2 —	Septembre	84,6 —
Avril	42,5 —	Octobre	204,1 —
Mai	18,1 —	Novembre	208,0 —
Juin	72,4 —	Décembre	164,5 —

Total : 1 451,4 mm

Le tableau 1 indique l'intervalle, en jours, séparant chaque coupe analysée ainsi que la quantité de matière sèche produite. Les tonnages récoltés sont du même ordre de grandeur que ceux obtenus dans des conditions plus proches de la pratique agricole mais restent cependant faibles dans l'ensemble. Les ray-grass anglais ont eu, en particulier, une production très faible dans ce terrain qui ne semble pas leur convenir : sol graveleux léger, exposition sud, absence de trèfle blanc, faible nitrification.

MÉTHODES ANALYTIQUES

Les matières azotées brutes sont obtenues en multipliant par 6,25 le chiffre d'azote obtenu par Kjeldahl.

Sur une destruction nitroperchlorique, on a déterminé P, Ca, K et Na. L'attaque de 2 g de matière sèche dans un petit vase à saturation de 50 cm³, en présence de 4 cm³ d'acide perchlorique pur et de 10 cm³ d'acide nitrique pur, s'effectue lentement au bain de sable avec un minimum de surveillance. On chauffe plus fort à la fin, jusqu'à dessiccation presque totale sans risque de perte de phosphore.

Le phosphore est déterminé sur la reprise perchlorique par cœruléomolybdimétrie dans les conditions définies par L. DUVAL (DUVAL, 1960). Le calcium a été dosé par complexométrie grâce au nouvel indicateur de PATTON et REEDER et suivant leur technique (PATTON et REEDER, 1956). Le potassium et le sodium sont déterminés, après dilutions convenables, par un photomètre à flamme de butane. Pour le magnésium, devant les mauvais résultats obtenus par complexométrie, nous avons effectué les dosages par la méthode classique suivante : calcination, reprise chlorhydrique, élimination des sesquioxydes, élimination du calcium par l'oxalate, précipitation du phosphate ammoniacomagnésien, dissolution du précipité dans SO_4H_2 N/50 et titration. Sur un certain nombre d'échantillons, le magnésium a été dosé par colorimétrie au jaune titane suivant la technique de J. CARLES. Les résultats ont été très voisins de ceux que nous avions obtenus par la méthode classique (CARLES, 1957).

Le manganèse est dosé par colorimétrie après incinération en creuset de platine, reprise fluorhydrique des cendres et oxydation par le périodate de sodium (COPPENET, 1959). Pour le cuivre, on a utilisé la colorimétrie au 2-2′ diquinolyle, après destruction nitroperchlorique de la matière, suivant la technique décrite dans les Annales agronomiques (COPPENET, et *al.*, 1954).

RÉSULTATS

1° *Matières azotées totales* (*tableau* 2)

Les teneurs en matières protéiques brutes des pâturages d'été sont souvent de l'ordre de 100 g par kilog, elles ne dépassent que très rarement 130 g/kg. Le pâturage de décembre est de beaucoup le plus riche pour toutes les espèces de graminées puis-

qu'on atteint 200 g/kg. Les teneurs des différentes coupes de ray-grass italien varient peu entre mars et août (100 à 130 g/kg). Pour les dactyles nous avons 170 g/kg en avril, 115 g/kg en septembre pour remonter à 185 et 212 g/kg en décembre.

TABLEAU 2

Teneurs en matières protéiques brutes ‰ de M. S. (N × 6,25)	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
Ray-grass italien :										
Rina	121		143	110	136	98				213
Ray-grass hybride :										
Io	123		121	106	134	101				190
Ray-grass anglais :										
Primevère		115		105			99			166
Melle Pâture ...			79				121			149
Dactyles :										
Germinal		179	129		140		117			212
Floréal		171		134	115		113			185
Prairial			91		132	107	134			187
Fétuque des prés :										
Naïade		119		95			117			146
Fétuque élevée :										
S. 170.....	159	123		102			76			124
Fléole :										
Maintenon			128		111		108			

Ces variations s'expliquent, partiellement tout au moins, par les variations du rapport feuilles sur tiges. (GUEGUEN, 1959 et 1960). Nos dosages ne permettent pas de distinguer une influence de l'espèce sur la richesse azotée de la matière sèche. Dans l'ensemble, nous pouvons conclure que ces graminées pures sont faibles en azote par rapport aux besoins des laitières exigeantes, évalués à 130-150 g/kg.

2° *Phosphore* (*tableau* 3)

D'une manière générale, les pâturages les plus riches en phosphore sont les premiers et les derniers. Les teneurs maxima dépassent légèrement 5 g de P par kg de matière sèche, tandis que les teneurs minima sont voisines de 2,5 g/kg. L'influence du rapport feuilles sur tiges se fait sentir, là aussi, comme dans le cas de l'azote.

Les ray-grass *Rina* et *Io* maintiennent pendant les coupes d'été leur teneur entre 3,23 et 5,08 g/kg, les dactyles entre 2,28 et 4,78 g/kg. Les fétuques sont moins bien pourvues puisque leur teneur est voisine de 2,6 g/kg en juin et en septembre.

Si l'on admet qu'il faut 4 g/kg au pâturage pour les fortes productions laitières (30 litres) la pâture des graminées sera fréquemment insuffisante. Par contre, le minimum de 2 à 2,5 g/kg correspondant aux productions de 5 à 10 litres serait toujours assuré (JARRIGE, 1956), (COLEOU, 1957).

TABLEAU 3

Teneurs en phosphore ‰ de M. S.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
Ray-grass italien :										
Rina	5,23		3,43	3,23	4,57	4,75				5,22
Ray-grass hybride :										
Io	4,57		3,57	2,45	4,33	5,08				5,09
Ray-grass anglais :										
Primevère		4,05		2,46			3,84			4,11
Melle pâture ...			2,58				3,43			2,90
Dactyles :										
Germinal		4,78	2,78		3,16		4,31			3,87
Floréal		3,83		2,66	2,28		4,78			4,78
Prairial			3,22		3,57	2,82	4,78			4,57
Fétuque des prés :										
Naïade		3,78		2,62			2,60			4,17
Fétuque élevée :										
S. 170.....	4,48	3,68		2,66			2,82			3,00
Fléole :										
Maintenon			2,92		2,91		2,45			

3° *Calcium* — *Rapport* Ca /P (*tableaux* 4 *et* 5)

Les plus faibles richesses en calcium sont obtenues aux premières coupes du dactyle *Floréal* (3,2 g Ca par kg) et de la fétuque élevée *S-170* (3,6 g). Les taux les plus élevés sont obtenus avec la fétuque des prés *Naïade* : 6,9 7 et 7,5 g /kg. Les coupes d'été des ray-grass *Rina* et *Io* donnent entre 5 et 6,5 g de Ca par kg, des dactyles entre 5,2 et 6,2 g /kg. La fétuque élevée et la fléole semblent moins riches

TABLEAU 4

Calcium Ca ‰ de M. S.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
Ray-grass italien :										
Rina	5,3		5,6	4,8	6,5	6,2				4,5
Ray-grass hybride :										
Io	5,5		5,3	5,0	5,8	5,8				4,4
Ray-grass anglais :										
Primevère		3,7		5,75			5,5			3,9
Melle Pâture ...			6,3				5,4			5,8
Dactyles :										
Germinal		4,6	6,1		7,1		5,5			4,9
Floréal		3,2		5,5	6,2		5,2			4,74
Prairial			4,6		5,8	6,1	5,3			4,9
Fétuque des prés :										
Naïade		7		6,87			7,5			5,3
Fétuque élevée :										
S. 170.....	3,6	3,95		5,1			4,6			3,8
Fléole :										
Maintenon			4		4,86		4,4			

TABLEAU 5

Rapports Ca/P	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
Ray-grass italien :										
Rina	1,02		1,63	1,48	1,42	1,3				0,86
Ray-grass hybride :										
Io	1,2		1,48	2,04	1,34	1,14				0,86
Ray-grass anglais :										
Primevère		0,91		2,34			1,43			0,95
Melle Pâture ...			2,44				1,57			2,0
Dactyles :										
Germinal		0,96	2,2		2,25		1,27			1,26
Floréal		0,83		2,07	2,72		1,08			0,99
Prairial			1,43			2,16	1,11			1,07
Fétuque des prés :										
Naïade		1,85		2,62			2,88			1,27
Fétuque élevée :										
S. 170.....	0,8	1,07		1,92			1,63			1,27
Fléole :										
Maintenon			1,37		1,67		1,80			

avec 4 à 5 g/kg. Pour la plupart des espèces, il y a accroissement de la teneur en calcium de la première coupe aux coupes d'août et septembre, phénomène déjà signalé (FAUCONNEAU et JARRIGE, 1957, p. 212). Enfin, la fétuque des près *Naïade* apparaît, dans notre essai également, comme la plus riche en calcium des graminées (FAUCONNEAU et JARRIGE, 1957, p. 210).

La plupart des pâturages de cet essai assurent donc, au point de vue calcium, les plus fortes productions laitières de 25 à 35 litres avec 5 à 6 g Ca/kg. Seules la fétuque élevée *S-170* et la fléole *Maintenon* n'assureraient pas cette production, le taux de calcium restant inférieur à 5 g /kg.

Rapport calcium sur phosphore.

Les variations de ce rapport vont suivre surtout celles du calcium et l'on constate, en effet, une légère augmentation allant de la première pâture aux pâtures d'été. La fétuque des prés *Naïade* dont la matière sèche est particulièrement riche en calcium présente les rapports Ca/P les plus élevés : 2,62 et 2,88 pour juin et septembre. Les rapports Ca /P du ray-grass italien sont de 1,02 et 0,86 pour la 1re et la dernière coupe mais varient entre 1,3 et 1,63 pour les quatre pâturages d'été ; ceux des dactyles varient entre 1,1 et 2,25 pendant l'été.

La plupart de ces rapports sont compris entre 1 et 2, donc théoriquement, convenables pour les bovins.

4° *Magnésium* (*tableau* 6)

Le magnésium suit les variations du calcium au cours de l'année puisque les premiers pâturages de ray-grass italien ont des teneurs voisines de 1 g /kg alors que les derniers pâturages voient leur teneur monter vers 1,8 g /kg. Ce phénomène est général pour toutes les espèces : par exemple, les dactyles *Germinal* et *Floréal* dassent de 1,7 g /kg en avril à 2 g /kg en décembre. Dans l'ensemble, toutes les concen-

TABLEAU 6

Teneurs en Mg °/₀₀ de M. S.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
Ray-grass italien :										
Rina	1,02		1,32	0,9						1,8
Ray-grass hybride :										
Io	1,2									1,74
Dactyles :										
Germinal		1,74	1,6							2,04
Floréal		1,67								2,1
Prairial			1,2		1,16					1,98
Fétuque des prés :										
Naïade		1,38		1,32						
Fétuque élevée :										
S. 170	1,5	1,56		1,98						1,56
Fléole :										
Maintenon			0,66		1,14					

trations en magnésium sont comprises entre 1 et 2 g /kg de matière sèche. Ces chiffres sont très voisins de ceux donnés par REBISCHUNG dans son étude sur la composition du dactyle : teneurs des repousses de cinq semaines souvent comprises entre 1,5 et 2,2-2,4 g /kg (REBISCHUNG, 1961). Les besoins des animaux seraient donc couverts s'il s'agit de jeunes (0,5 à 1 g /) alors que vis-à-vis des fortes laitières (3 g), un déficit sérieux reste à combler.

5° *Potassium* (*tableau 7*)

La grande majorité des dosages révèle des concentrations voisines ou légèrement supérieures à 20 g de K par kg de matière sèche. Les concentrations dépassent 30 g /kg à la première coupe du dactyle *Germinal* (35 g), de la fétuque élevée *S-170* (34 g) et des ray-grass *Rina* et *Io* (31,4 g). Il n'apparaît pas de différences en fonction des

TABLEAU 7

Potassium en K °/₀₀ de M. S.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
Ray-grass italien :										
Rina	31,3		27,4	20	22,7	21,5				26,5
Ray-grass hybride :										
Io	31,4		27	22	23,6	23,6				28,3
Ray-grass anglais :										
Primevère		24		17,4			16,4			24,1
Melle Pature ...			18,2				19,1			23
Dactyles :										
Germinal		35	22		21,3		20,5			19,4
Floréal		27,5		26	21		21,3			19,6
Prairial.....			26		26,6	27,8	26,1			22
Fétuque des prés :										
Naïade		26,2		22,8			20,8			19
Fétuque élevée :										
S. 170	34	26,7		15,6			18,2			22,6
Fléole :										
Maintenon			23,4		22		20,7			

espèces. Ces quantités de potassium sont naturellement largement capables de subvenir aux besoins des animaux, mais, d'autre part, il nous paraît difficile d'abaisser la concentration en K au-dessous de 20 g/kg sans diminuer les rendements fourragers. Rappelons que 60 unités K_2O ont été épandues sur ces graminées au stade A mais que la potasse échangeable du sol était très faible en fin d'année.

6° *Sodium* — *Rapport* K/Na (*tableaux* 8 *et* 9)

A propos du sodium, il est possible de faire d'intéressantes constatations sur ses variations en cours d'année et sur les différences spécifiques. On observe d'abord un accroissement continu du premier au dernier pâturage. Par exemple :

Dactyle *Germinal*	2,39 g/kg	(1re	coupe)	4,0 g/kg	(dernière coupe)
Dactyle *Prairial*	1,6 g/kg	—		6,3 g/kg	—
R.-G. *Primevère*	2,78 g/kg	—		4,36 g/kg	—
Fétuque *S-170*	1,45 g/kg	—		2,25 g/kg	—
R.-G. *Rina*	0,69 g/kg	—		3,5 g/kg	—
Fétuque *Naïade*	0,27 g/kg	—		1,2 g/kg	—
Fléole *Maintenon*	0,13 g/kg	—		0,5 g/kg	—

Si nous considérons à présent, les pâturages d'été, nous obtenons le classement suivant par ordre de teneur décroissante :

Dactyles	2,9 à 4,5 g/kg
R.-G. anglais *Primevère*	2,64 à 3,15 g/kg
Fétuque élevée *S-170*	1,12 à 2,0 g/kg
R.-G. italien et hybride	1,0 à 1,8 g/kg
Fétuque des prés *Naïade*	0,19 à 0,27 g/kg
Fléole *Maintenon*	0,13 à 0,5 g/kg

Ces chiffres confirment les résultats obtenus par GUEGUEN, en comparant un dactyle et une fétuque et, par KERGUELEN : la fétuque des prés et la fléole contiennent aux environs de 20 fois moins de sodium que les dactyles (GUEGUEN, 1959), (KERGUELEN, 1960).

TABLEAU 8

Sodium en Na °/₀₀ de M. S.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
Ray-grass italien :										
Rina	0,69		1,63	0,69	1,71	1,80				3,5
Ray-grass hybride :										
Io	0,88		1,36	1,0	1,83	1,72				2,57
Ray-grass anglais :										
Primevère		2,78		3,15			2,64			4,36
Melle Pâture			1,95				1,23			2,69
Dactyles :										
Germinal		2,39	3,74		3,4		2,92			4,0
Floréal		2,0		5,0	3,64		2,96			4,56
Prairial			1,6		4,47	4,1	4,03			6,3
Fétuque des prés :										
Naïade		0,27		0,19			0,2			1,2
Fétuque élevée :										
S. 170	1,45	1,45		2,0			1,12			2,25
Fléole :										
Maintenon			0,13		0,17		0,5			

TABLEAU 9

Rapports K sur Na	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
Ray-grass italien :										
Rina	45,3		16,8	29	13,3	12				7,6
Ray-grass hybride :										
Io	35,6		20	22	12,9	13,7				11
Ray-grass anglais :										
Primevère		8,6		5,5			6,2			5,5
Melle Pâture ...			9,3				15,5			8,5
Dactyles :										
Germinal		14,6	5,9		6,2		7			4,8
Floréal		13,7		5,0	5,8		7,2			4,3
Prairial			16,2		6	6,8	6,5			3,5
Fétuque des prés :										
Naïade		97	120				104			15,8
Fétuque élevée :										
S. 170.....	23,4	18,4		7,8			16,2			10
Fléole :										
Maintenon			180		129		41			

Ce dernier auteur distingue un groupe de graminées pauvres en sodium avec la fétuque des prés, la fléole, la fétuque rouge, le brôme inerme et le pâturin des prés, puis un groupe de graminées beaucoup plus riches avec les dactyles, les ray-grass, la fétuque élevée. D'après nos chiffres, il semble possible de classer les graminées de ce groupe dans l'ordre suivant et par teneur décroissante :

— Dactyles,
— Ray-grass anglais,
— Fétuque élevée,
— Ray-grass italiens et hybrides.

Dans les conditions de notre champ d'expérience, aucune espèce de graminées n'est susceptible de satisfaire les besoins d'une moyenne laitière, consommant de l'herbe jeune, et évalués à 6 gNa par kg de matière sèche. Ce sont les dactyles qui se rapprochent le plus de cette quantité minima de sodium mais les ray-grass italiens et hybrides, les ray-grass anglais et la fétuque élevée fournissent toujours des pâturages apportant le sodium nécessaire aux besoins des jeunes bovins, soit 1 à 2 g/kg.

Rapport potassium sur sodium.

Ce rapport est sans doute important dans l'alimentation des animaux domestiques bien que les précisions manquent à ce propos. Toutefois on souhaite le voir le plus bas possible puisqu'on redoute, à la fois, les excès de potassium et les insuffisances de sodium.

Vu les teneurs en K et Na, nous pouvons nous attendre à enregistrer des variations suivant les variations de Na. Le rapport K/Na des pâturages d'été varie de 5 à 7 pour les dactyles et le ray-grass anglais *Primevère*, de 12 à 19 pour les ray-grass italien et hybride mais il atteint 120 et 180 dans le cas de la fétuque des prés et de la fléole.

7° *Manganèse* (*tableau* 10)

Le manganèse est un oligo-élément à l'égard duquel les végétaux sont extrêmement plastiques. Au-dessous de 20 ou 25 p.p.m. de Mn dans la matière sèche d'une feuille, on peut suspecter une carence manganique. Des teneurs de 100 ou 200 p.p.m. sont tout à fait normales, alors que la toxicité ne serait à craindre qu'au-delà de

TABLEAU 10

Manganèse en p. p. m. de Mn/M.S.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
Ray-grass italien :										
Rina	23,4		155	89,8	103	185				166
Ray-grass hybride :										
Io	25,1		75	81	99	168				240
Ray-grass anglais :										
Primevère		35,8		96			228			175
Melle Pature ...			160				237			209
Dactyles :										
Germinal		42,1	140		180		230			440
Floréal		43,3		39,3	176,5		152			406
Prairial			41,3		147	227	243			169
Fétuque des prés :										
Naïade		20,5		25			176			226
Fétuque élevée :										
S. 170.....	28	129		118			173			456
Fléole :										
Maintenon			126		40,2		73			

500 p.p.m. Nous avons, personnellement, trouvé des quantités voisines de 5 000 p.p.m. (0,5 p. 100) de Mn dans la matière sèche de tiges de pommes de terre souffrant d'intoxication manganique et voisines de 13 000 p.p.m. (1,3 p. 100) pour une plante de haricot récoltée dans ces mêmes conditions (COPPENET, 1959 et 1960).

Pour les plantes annuelles, ces variations proviennent d'abord du sol qui règle l'alimentation par son pH et sa teneur en oxydes de manganèse. Dans le cas des graminées pluriannuelles, soumises à un régime de coupes répétées, interviennent des questions de vitesse de croissance, de renouvellement des racines, d'aération du sol et peut-être d'activité microbienne, l'alimentation manganique étant soumise aux facteurs favorables à la réduction des oxydes supérieurs de manganèse présents dans le sol. Nous n'avons pas jusqu'à présent étudié ces questions en détail. La parcelle d'expérience, nous l'avons vu au début de ce mémoire, a un pH légèrement inférieur à 6 avec un manganèse actif nettement supérieur au seuil de carence donc l'alimentation manganique est bonne. Malgré cela, les première récoltes de ray-grass italien et de fétuque des prés contiennent une quantité de Mn voisine du seuil de carence (23,4 et 20,5 p.p.m.). Les différentes coupes d'été apportent 100 à 200 p.p.m. de Mn quelles que soient les espèces, la coupe de décembre révèle des teneurs de 440 p.p.m. pour *Germinal* et de 456 p.p.m. pour *S*-170, les dactyles paraissant les mieux pourvus dans l'ensemble.

Si nous souhaitons avec BENTLEY et PHILLIPS, trouver 20 p.p.m. de Mn dans la matière sèche de la ration des bovins, nous sommes rassurés avec ces graminées sauf, peut-être, au cours des premiers pâturages. Toutefois, nous savons qu'en sol breton nettement carencé en manganèse, les ray-grass italiens au stade floraison peuvent contenir moins de 20 p.p.m. de Mn et, qu'en sol breton normalement pourvu en Mn ces teneurs peuvent être comprises entre 50 et 100 p.p.m.

Actuellement, en Angleterre, on adopte comme norme de sûreté 100 p.p.m. et en Hollande 150 p.p.m. pour des vaches laitières en exploitation intensive (GRASHUIS, communication verbale). Dans ces conditions, nos graminées fourniront souvent des doses de manganèse inférieures à ces seuils même sur des sols relativement acides et normalement pourvus en Mn.

8° *Cuivre* (*tableau* II)

Le tableau II nous montre des teneurs en Cu comprises entre les extrêmes de 4 et 11 p.p.m., la plupart des valeurs étant comprises entre 6 et 10 p.p.m. La moyenne générale des différentes coupes des ray-grass italien et hybride est de 8,22 p.p.m., celle des dactyles 7,75 p.p.m. mais il n'est pas possible de dégager une loi sur les variations de teneur en fonction de la saison ou de l'espèce. Il y a lieu de faire remarquer à ce propos la difficulté de déterminer avec précision cet oligo-élément à cause de contaminations toujours possibles au cours de la préparation des échantillons et en raison également de l'imperfection de la méthode de dosage elle-même.

TABLEAU II

Cuivre en p.p.m. de Cu/M. S.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
Ray-grass italien :										
Rina	10		4	6	9,5					11
Ray-grass hybride :										
Io	8,5		7,5	6	10	8				10
Ray-grass anglais :										
Primevère				6			10			9,5
Melle Pâture ...			5,5				7			9
Dactyles :										
Germinal		6	6		10		6			7
Floréal				7	7		5,5			11
Prairial			7		10	7,5	8,5			10
Fétuque des prés :										
Naïade		5,5		5			7			4
Fétuque élevée :										3
S. 170.....	5,5	7,5		5,5			4,5			6
Fléole :										
Maintenon			5		8		7,5			

KERGUELEN a constaté une baisse rapide du cuivre au fur et à mesure de l'épiaison et à partir d'une teneur assez élevée en début de printemps (KERGUELEN, 1960).

Quelles sont les normes généralement admises pour une bonne alimentation des animaux? SJOLLEMA, pour les sols sableux et les polders hollandais trouve dans les foins des zones saines : 7,5 p.p.m. de Cu, et, dans les foins des zones où sévissent des carences : une moyenne de 2 à 3 p.p.m. Cu avec comme extrêmes 1 et 5 p.p.m.

(SJOLLEMA, 1933). CUNNINGHAM, en Nouvelle-Zélande, pour des sols de marais tourbeux, trouve au moins 10 p.p.m. de Cu dans les fourrages des zones saines et 2 à 5 p.p.m. dans les fourrages des zones malades (CUNNINGHAM, 1944). Une équipe de chercheurs suédois (LUNDBLAD, SVANBERG, EKMAN, 1949) signale les chiffres respectifs suivants : 6 à 7 p.p.m. et 1 à 2 p.p.m. Ces auteurs fixent la teneur minimum à 4 p.p.m. D'autre part, GRASHUIS, cite MITCHELL qui considère une teneur de 5 à 6 p.p.m. normale pour les veaux.

Les fourrages récoltés sur les sols granitiques bretons carencés en Cu, nous donnent habituellement des chiffres inférieurs à 5 p.p.m. Aussi, en situant avec la plupart des auteurs le seuil à 5 p.p.m., nous nous apercevons que même au stade pâturage, les graminées étudiées ici contiennent parfois à peine plus de cuivre que le minimum exigé.

GRAMINÉES RÉCOLTÉES AU NIVOT EN AOÛT 1961

La coupe effectuée le 8 août 1961 correspondait également au stade pâturage. Elle a été analysée dans les mêmes conditions que ci-dessus. Dans ce champ d'expérience, les graminées ont été semées en mélange avec du trèfle blanc mais elles ont été séparées de la légumineuse avant analyse. Le sol est riche en P_2O_5, moyennement pourvu en K_2O, le pH est de 6-6,1 avec une forte teneur en manganèse actif et une teneur normale en cuivre, il est d'origine schisteuse.

Azote :

Le ray-grass anglais *Melle pâture* et la fléole *Maintenon* ne contiennent qu'aux environs de 100 g/kg de matières azotées mais la fétuque *Sequana* en contient 122 g, le dactyle *Floréal* 129 g, le dactyle *Germinal* 137 g.

Phosphore :

Dactyles	3,68 à 3,89 g de P/Kg	(suivant	les	parcelles	et les variétés)
Fétuque des prés	2,98 à 3,71 g	—	—	—	—
Fléoles	2,25 à 2,92 g	—	—	—	—

Ces résultats sont assez voisins de ceux obtenus au champ de Quimper mais pour le calcium ils sont inférieurs.

Calcium :

Dactyles	3,44 à 4,06 g Ca/Kg
Fétuque des prés	4,25 à 6,46 g Ca/Kg
Fléoles	2,82 à 3,20 g Ca/Kg

Magnésium :

Dactyles	1,73 à 1,97 g Mg/Kg
Fétuque des prés	1,34 à 1,99 g Mg/Kg
Fléoles	1,11 à 1,86 g Mg/Kg

Ces résultats confirment les ordres de grandeur trouvés pour Quimper.

Potassium :

Les teneurs sont nettement plus élevées ici :

Dactyles	27,4 à 39,3 g de K/Kg
Fétuques des prés	32,5 à 42,1 g de K/Kg
Fléoles	25,6 à 26,6 g de K/Kg

Sodium :

Les variations énormes de teneur en sodium suivant les espèces se trouvent confirmées :

Dactyles (*Germinal, Floréal, Prairial*)	2,52-3,31-4,6 g Na/Kg
R.-G. anglais *Melle pâture*	1,19-1,43 g Na/Kg
Fétuque élevée *Manade*	0,56-0,68 g Na/Kg
Fétuques des prés (*Naïade, Sequana*)	0,08-0,13-0,17-0,22 g Na/Kg
Fléoles (*Maintenon, Pecora*)	0,08-0,17 g Na/Kg

Manganèse :

Les teneurs en manganèse sont toujours très bonnes : plus de 200 p.p.m. de Mn /M.S. pour les dactyles, plus de 300 p.p.m. pour le ray-grass anglais, aux environs de 200 p.p.m. pour les fétuques.

Cuivre :

Comme au champ de Quimper, les teneurs sont comprises entre 5 et 10 p.p.m.

Dactyles	8 p.p.m.
Fétuques des prés	5-6-7 p.p.m.
Fléoles	5-7 p.p.m.

CONCLUSION

La collection de graminées fourragères du champ d'expériences de la Station d'Agronomie de Quimper a été utilisée, en 1960, pour l'étude de la composition minérale de chacune des coupes de l'année. Dix variétés ont été choisies parmi sept espèces de graminées et exploitées suivant un rythme de pâturages successifs. Les résultats analytiques permettent de dégager un certain nombre d'observations intéressantes, tant du point de vue des différences spécifiques que des points de vue des variations au cours de l'année ou des conséquences zootechniques.

C'est avec le sodium qu'apparaissent les variations spécifiques les plus importantantes puisque nous pouvons distinguer un groupe de graminées riches et un groupe de graminées pauvres. Dans le premier groupe, nous trouvons les dactyles, le ray-grass anglais, la fétuque élevée, le ray-grass italien et hybride (1 g à 4,5 g /kg), dans le second groupe la fétuque des prés et la fléole (0,13 à 0,5 g/kg).

La fétuque des prés *Naïade* est la graminée la plus riche en calcium (7 g/kg), la fétuque élevée *S-170* et la fléole *Maintenon* sont les graminées les moins riches (4 à 5 g/kg). Pour le magnésium, nos dosages ne permettent pas d'observer des différences de teneurs valables mais pour le phosphore, fétuques et fléoles apparaissent un peu moins riches que ray-grass et dactyles. Parmi les deux oligo-éléments dosés, il n'apparaît pas de grosses variations de teneurs en cuivre mais les variations des teneurs en manganèse, faibles en fonction des espèces, deviennent très importantes en fonction de l'époque de l'année. Les dactyles ont, dans les conditions de notre essai, les teneurs les plus fortes en manganèse.

Des écarts sérieux existent entre les premiers et les derniers pâturages de l'année. L'azote est le plus élevé à la première et surtout à la dernière coupe. Le phénomène est sensiblement le même pour le phosphore. La teneur en calcium augmente depuis

le premier pâturage jusqu'à ceux d'août et septembre. Le potassium est élevé au 1er pâturage puis plus faible et constant par la suite. Sodium et manganèse subissent des variations parallèles, à savoir : un accroissement continu de la première à la dernière exploitation.

Au point de vue zootechnique, nous manquons de normes bien établies pour chaque élément et, d'autre part, nous ne pouvons pas généraliser nos résultats à tous les sols et à toutes les conditions d'exploitation. Cependant, si nous voulons avoir un aperçu des possibilités des pâturages de graminées, voici ce qu'il est possible de dégager :

Pour les laitières exigeantes, K est toujours en excès, N, P, et Ca sont souvent insuffisants, Mg et Na sont toujours insuffisants. Les matières protéiques brutes tombent souvent à 100 g/kg pendant l'été. P est souvent inférieur à 4 g/kg avec la fétuque élevée et la fléole. Le déficit sodique est d'autant plus sérieux si l'on pâture la fétuque des prés ou la fléole. En considérant les besoins des jeunes bovins, il apparaît, par contre, que les sels minéraux contenus dans les graminées au stade pâturage seraient, la plupart du temps, suffisants sauf dans le cas du sodium et pour la fétuque des prés et la fléole.

Reçu pour publication en mars 1962

SUMMARY

VARIATIONS IN THE MINERAL COMPOSITION OF TEN GRAMINACEOUS GRASSLAND VARIETIES DURING ONE-YEAR CONTROLLED GRAZING

Ten graminaceous grassland varieties, sown on the same soil, were used for controlled grazing during a year. The grass was mown each time a period of grazing was ended.

The grasses were : Italian ryegrass (*Lolium italicum* A. Br.), perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.) hybrid ryegrass (*Lolium hybridum* Hausskn.,), cocksfoot (*Dactylis glomerata* L.), tall and meadow fescue (*Festuca arundinacea* Schreb., *F. elatior*) and timothy (*Phleum pratense* L.). The contents of N, P, Ca, K, Mg, Na, Cu and Mn were determined in the dry matter of each cutting. The most marked specific variations occurred in respect of Na, cocksfoot, perennial ryegrass, hybrid ryegrass and tall fescue being rich in this element, and meadow fescue and timothy being poor.

Meadow fescue contained more Ca than tall fescue and timothy. Fescue and timothy contained somewhat less P than ryegrass and cocksfoot did. The Cu contents were rather similar but the Mn contents slightly varying according to species showed great variations according to the time of the season. There was an increase in Ca from the first grazing onwards until the grazing in August and September ; the K content was high at the first grazing and constantly lower afterwards ; The Na and Mn contents continually increased from the first to the last grazing.

On the basis of general values accepted by animal breeders, grazing of pure graminaceous plants appear to supply often insufficient amounts of N, P, Ca and Mg to milking cows, whole Na is always in insufficient supply. As far as the requirements of young cattle is concerned, sufficient mineral elements are generally supplied by graminaceous plants, except for Na and in the case of fescue and timothy.

ZUSAMMENFASSUNG

VERÄNDERUNGEN IN DER MINERALISCHEN ZUSAMMENSETZUNG VON ZEHN FUTTERGRÄSERN WÄHREND DER DAUER EINER JAHRESWEIDE

Zehn Futtergräser wurden auf den gleichen Boden ausgesät und während der Dauer eines Jahres beweidet. Sobald ihr Stadium demjenigen einer Beweidung entsprach, wurde mit der Sichel ein Schnitt ausgeführt.

Es handelt sich um ein welsches Weidelgras (*Lolium italicum* A. Br) ein Bastard deutschen Weidelgrasses (*Lolium hybridicum* Hauskn.), zwei deutsche Weidelgräser (*Lolium perenne* L.), drei Knaulgräser (*Dactylis glomerata* L.) einen Wisenschwingel (*Festuca pratensis* L.) einen Rohrschwingel (*Festuca arundinacea* Schreb.) und ein Lieschgras (*Phleum pratense* L.), Die Trockenmasse der verschiedenen Schnitte wurde auf den Gehalt an N, P, K, Ca, Mg, Na, Cu und Mn untersucht, Die wichtigsten zpezifischen Veränderungen betreffen Na, da man eine reiche Gruppe mit Knaulgras.

deutschem Weidelgras, Rohrschwingel und dem Bastard-Weidelgras sowie eine ärmere Gruppe mit Wiesenschwingel und Lieschgras unterscheidet.

Der Wiesenschwingel hat den höchsten Ca-Gehalt, Rohrschwingel und Lieschgras den niedrigsten. Schwingel und Lieschgras enthalten etwas weniger P als Weidel- und Knaulgras. Der Cu-Gehalt ist fast überall der gleiche, aber die Schwankungen des Mn-Gehaltes sind gering für die verschiedenen Arten unter sich aber stark je nach Jahreszeit. Ca nimmt von der ersten bis zur letzten Beweidung im August-September stets zu. K ist am Anfang hoch, nimmt dann ab und bleibt bis zum Ende konstant. Na und Mn nehmen von der ersten bis zur letzten Beweidung dauernd zu.

Nimmt man die in der Viehwirtschaft allgemein gültigen Normen an, so kommt man zu der Schlussfolgerung, dass reine Gräser sehr oft zu wenig N, P, Ca, und Mg an sehr gute Milchkühe abgeben. Na ist immer ungenügend. Für die jungen Rinder wären die Mineralgaben im allgemeinen genügend, ausser Na und für Wiesenschwingel und Lieschgras.

Изменения минерального состава у десяти различных сортов кормовых злаков выращивавшихся пастбищным тэмпом в течении одного года.

М. КОППЕНЭ и Жанина КАЛЬВЕЗ (Кэмпер).

Десять разных сортов кормовых злаков были посеяны на одной и той-же почве и выращивались в течении года пастбищным тэмпом. Жатвы производились регулярно, при помощи серпа, каждый раз как достигалась стадия соответствовавшая прохождению скота.

Опыт включал следующие сорта : итальянский рай-грасс (*Lolium italicum* A. Br.), гибридный рай-грасс (*Lolium hybribum* Haussкn.), два сорта английского рай-грасса (*Lolium Perenne* L.), три сорта ежи (*Dactylis glomerata.*), один из сортов тростниковидной овсянницы (*Festuca arundinacea* Schreb.), один — овсянницы луговой, и один из сортов тимофеевки (*Phleum pratense.*). После каждой жатвы производился дозаж количеств N, P, Ca, K, Mg, Na, Ca, и Mn заключавшихся в сухой массе.

Наиболее крупные специфические изменения констатированы были для Na. Тут была возможность различить две группы : группа — богатая этим элементом — в которую входят все сорта ежи, английский рай-грасс и гибридный, а также овсянница тростниковидная, и — группа бедная, включающая луговую овсянницу и тимофеевку.

Луговая овсянница — наиболее богата Кальцием, овсянница-же тростниковидная и тимофеевка заключают наименьшие количества этого элемента. Все сорта овсянницы и тимофеевка заключают немного меньше фосфора чем испробованные сорта рай-грасса и ежи. Количества меди — более или менее одинаковы во всех испробованных злаковых, но, если количества найденного марганца изменяются мало в зависимости от сорта злака, то наоборот — наблюдаются крупные сезонные изменения количеств этого элемента в сухой массе. Количества извести увеличиваются после первого прохождения скота, и до Августа — Сентября. K — достигает максимума после первого прохождения, но количества его затем уменьшаются прежде чем окончательно стабилизоваться. Количества натрия и марганца — непрерывно увеличиваются на всем протяжении опыта.

Опираясь на нормы принятые обычно зоотехниками, можно после этого опыта вывести заключение, что пастбища состоящие исключительно из кормовых злаковых — не предоставляют требовательным молочным породам коров достаточных количеств азота, фосфора, извести и магнезия. Количества натрия — можно также считать недостаточными.

Что-же касается рогатого молодняка, то количества минеральных элементов которое он находит в кормовых злаках ему как-будто хватает, за исключением натрия в случаях луговой овсянницы и тимофеевки.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BENTLEY et PHILLIPS (cité par COLEOU).

CARLES J., 1957. Microdosage colorimétrique du magnésium. *Bull. Soc. Chim. Biol.*, **4**, 445-452.

COLEOU J., 1957. Minéraux, Vitamines, Antibiotiques. *Revue de l'élevage*, n° spécial, 67-87.

COPPENET M., DUCET G., CALVEZ J., BATS J., 1954. Microdosage colorimétrique du cuivre dans les végétaux par la 2-2 diquinoléine. *Ann. agron.*, **4**, 597-600.

COPPENET M., 1959. Le manganèse dans les sols de Bretagne et ses relations avec la croissance des végétaux. *Ann. agron.*, **11**, 155-218.

COPPENET M., Mme CALVEZ J., 1960. Observation d'un cas d'intoxication manganique de la Pomme de terre sur sol très acide. *C. R. acad. agric.*, 728-733.

CUNNINGHAM I. J., 1944. Copper deficiency in cattle and sheep. Occurence and control in New-Zealand. *New-Zealand J. Agr.*, **69**, 559-569.

DUVAL L., 1960. Dosage céruléomolybdimétrique du phosphore : influence de l'acidité et de la concentration molybdique. *Travaux des Stations d'Agronomie, I. N. R. A.*, 1 R-2 R.

FAUCONNEAU G., JARRIGE R., 1957. Composition chimique et valeur nutritive de l'herbe. *Bull. Techn. Ing. Serv. Agric.*, n° 118, 173-214.

GRASHUIS. Communication verbale et cité par REDLICH G. C., 1961. Intensification fourragère, oligo-éléments et santé des bovins. *Bull. CETA*, n° 529, élevage 44.

GUEGUEN L., 1959. Étude de la composition minérale de quelques espèces fourragères. Influence du stade de développement et du cycle de végétation. *Ann. Zootech.*, **8**, 245-268.

GUEGUEN L., FAUCONNEAU G., 1960. Étude sur les variations des teneurs en matières azotées et en éléments minéraux du dactyle. *Ann. Zootechn.*, **9**, 157-179.

JARRIGE R., FAUCONNEAU G., 1956. Aspects physiologiques de l'utilisation intensive de l'herbe. *Bull. Tech. Ing. Serv. Agric.*, n° 115, 865-883.

KERGUELEN M., 1960. Aspects des variations de la composition de quelques fourrages en fonction des espèces des stades de végétation, des conditions de sol et de fertilisation. *Ann. Amélior. Plantes*, **10**, 177-236.

LUNDBLAD K., SVANBERG O., EKMAN P., 1948. Assimilabilité et fixation du cuivre dans les sols suédois. *Plant and Soil.*, 277-302.

PATTON J., REEDER W., 1956. New indicator for titration of calcium with (Ethylenedinitrilo) tetraacétate. *Anal. Chem.*, **28**, 1026-1028.

REBISCHUNG J., 1961. Le dactyle est-il une bonne plante fourragère ? *Fourrages*, n° 7, p. 3-16.

SJOLLEMA B., 1933. Copper deficiency as cause of disease in plants and animals. *Biochem. Ztschr.*, **267**, 151-156.

Ann. agron., 1962, **13** (3), 221-253.

581. 526. 53 (61)

CONTRIBUTION A L'ÉTUDE PHYTOSOCIOLOGIQUE DU SAHARA OCCIDENTAL

L'action des irrigations sur la végétation spontanée

P. QUEZEL et P. SIMONNEAU

Faculté des Sciences d'Alger ; Service de la Carte phytosociologique de l'Algérie. Service scientifique de l'Hydraulique

SOMMAIRE

Les groupements végétaux individualisés dans les régions d'Igli (Association à *Salsola foetida* et *Salsola vermiculata*), de Kerzaz (Association à *Salsola foetida* et *Salsola vermiculata* faciès à *Zygophyllum album*) et d'Adrar (peuplement pur de *Zygophyllum album* et *Zygophyllum Geslini*) avant la mise en cultures, sont caractérisés par la pauvreté de la flore, le faible degré de recouvrement et la taille réduite des individus. Ils dépendent étroitement des facteurs édaphiques et climatiques, particulièrement de l'humidité. De plus le salant, dont la présence est presque permanente, joue un rôle limitatif considérable.

La mise en irrigation avec des eaux chargées à Adrar et Igli et des eaux douces provenant de la nappe phréatique du Grand Erg occidental à Kerzaz a provoqué l'apparition et l'installation :

1° dans les alluvions limoneuses et salées de la vallée de la Saoura, à Igli, de l'Association à *Suaeda fruticosa* et *Sphenopus divaricatus*, caractéristique des solontchaks humides du Tell algérien ;

2° dans les alluvions profondes, sablonneuses et saines, situées en bordure de l'Erg, à Kerzaz, d'un groupement cultural, qui n'a pu être complètement individualisé en raison de l'arrêt de l'expérimentation ;

3° dans les solontchaks inertes de la région d'Adrar, de l'Association à *Salsola foetida* et *Salsola vermiculata*, caractérisée par une abondance exceptionnelle d'espèces végétales rudérales et anthroponitrophiles.

INTRODUCTION

L'aménagement et l'équipement des Centres d'Études d'Irrigation, créés à Igli, Kerzaz et Adrar par la Direction de l'Hydraulique et de l'Équipement rural (Circonscription d'Oran-Tlemcen), nous ont amenés à envisager l'étude de la végétation spontanée, préexistant à l'installation de ces périmètres, et surtout, à en suivre l'évolution, à la suite du défrichement, de la mise en culture et de l'irrigation.

Si aucun travail de ce genre n'a encore été fait au Sahara, il n'en est pas moins d'un grand intérêt de connaître les modifications que peut présenter le tapis végétal d'une zone déterminée à la suite du défrichement de la végétation spontanée et de sa mise en irrigation.

C'est là un des aspects le plus important du problème de l'amélioration des pâturages sahariens, où, dans les régions irriguées ou semi-irriguées, il est bon de connaître avant de faire appel à des espèces étrangères, celles qui, dans la flore autochtone, sont susceptibles de prospérer et de constituer éventuellement un apport appréciable dans la constitution d'une couverture végétale artificielle, ayant une valeur pastorale aussi élevée que possible.

Les observations ont débuté pendant l'automne 1954. Elles ont été poursuivies jusqu'en 1961 au cours d'une douzaine de missions, faites par l'un de nous, aux dates suivantes :

1954 : 20 au 30 novembre;
1955 : 21 au 25 avril,
4 au 11 novembre ;
1956 : 14 au 20 mars,
17 au 21 avril,
5 au 9 juin,
12 au 18 novembre ;
1957 : 12 au 22 mars,
7 au 10 octobre,
21 au 29 octobre ;
1958 : 4 au 10 février,
10 au 17 mars,
15 au 18 avril,
1961 : 7 au 10 février.

Il a donc été possible de suivre en toutes saisons l'évolution de la végétation et la constitution des groupements individualisés.

Les stations visitées, presque toutes situées en bordure de la Souara et de la Piste Impériale n° 2, font partie du Sahara occidental dont la végétation est nettement différente et encore beaucoup moins bien connue que celle du Sahara central et du versant méridional de l'Atlas saharien.

En effet, les études phytosociologiques sahariennes, publiées jusqu'à ce jour, sont peu nombreuses, Elles intéressent les régions suivantes :

— Sahara Sud-tunisien : J. BRAUN-BLANQUET (1949) ; M. GUINOCHET (1951), LE HOUEROUX (1961).
— Béni-Ounif : G. LEMEE (1953) ;
— Massif du Hoggar : P. QUEZEL (1954) ;
— Sahara septentrional : M. GUINOCHET et P. QUEZEL (1954) ;
— Sahara occidental : P. QUEZEL et P. SIMONNEAU (1960).

Il faut encore signaler la carte au 1/200 000, établie par Ph. GUINET (1955), précisément dans la région de Béni-Abbès, dont malheureusement, l'interprétation est encore restée limitée à sa notice.

Ainsi, seuls, les trois derniers travaux cités apportent quelques précisions sur la végétation de la vallée de la Saoura, et c'est eux qui donneront les éléments de comparaison nécessaires à la compréhension et à l'interprétation des unités phytosociologiques qui seront individualisées.

Dans la présente étude, les régions suivantes, toutes localisées en bordure ouest du Grand Erg Occidental, ont été parcourues :

Igli : vallée en rive gauche de la Saoura, Périmètre expérimental ;
Kerzaz : région de Tazougar, Périmètre expérimental ;
Adrar : région des Ouleds Aroussa, Périmètre expérimental.

Les observations ont été faites selon la méthode zuricho-montpelliéraine.

Toutefois, dans l'étude de la flore et lors de l'individualisation des groupements végétaux, la *prépondérance a été donnée au facteur édaphique* en raison :

a) des conditions très particulières du milieu saharien ;

b) du but à atteindre : la recherche de sols propices à la pratique des cultures irriguées.

Au Sahara, comme partout, le climat (température-pluviométrie) et le sol ont une influence décisive sur l'apparition et l'évolution de la végétation. Alors que le facteur climatique peut en quelque sorte être corrigé par les irrigations, qui permettent de remédier dans une certaine mesure à l'insuffisance de la pluviométrie, le sol ne peut être aussi facilement modifié. Son action est donc plus marquante et la végétation le caractérise avec d'autant plus d'exactitude qu'elle est constituée par davantage d'*espèces pérennantes*, qui sont moins sensibles à l'influence de la pluviométrie.

Dans le Sahara, en effet, la moindre précipitation peut déterminer une poussée extraordinaire de la végétation sur les types de sols les plus divers : regs caillouteux, hamadas, éboulis, formations sablonneuses, etc. Elle est composée essentiellement par des espèces annuelles, à cycle évolutif parfois très réduit, qui sont installées, le plus souvent, sur des terrains impropres à toutes culture en raison de leur manque de profondeur.

Pourtant, pendant la courte période de leur évolution, la physionomie végétale, de ces régions, habituellement très arides et totalement dépourvues de végétation, change brusquement.

Les plantes germent, se développent rapidement grâce à une température extrêmement favorable, fructifient et disparaissent.

La concurrence vitale est alors intense car les individus croissent nombreux sur des surfaces restreintes. La densité des peuplements, établis sur des sols sans fond et dans des conditions très précaires, est toujours élevée. Elle aggrave le déficit en eau et parvient ainsi à déterminer un raccourcissement appréciable de la durée du cycle évolutif des annuelles dont la taille diminue considérablement si aucune précipitation n'intervient.

En général, quatre à six semaines après les pluies qui ont provoqué la levée des végétaux, l'aridité primitive réapparaît et, seules, se maintiennent les espèces pérennantes, solidement établies dans les terrains les plus profonds.

Ainsi, selon le moment de la visite (avant ou après la pluie) l'aspect végétal d'une région peut-il être complètement différent. Des observations phytosociologiques où les annuelles prendraient une place trop importante risqueraient alors de donner une idée fausse sur les possibilités agricoles des terrains.

L'étude des espèces annuelles, si complète soit-elle, n'a donc qu'une valeur surtout théorique au Sahara. Elle ne permet pas de tirer des conclusions sur la vocation des sols.

Dans la constitution des groupements végétaux, il faut donc souvent les considérer comme des compagnes dont le nombre et la variété sont fonction de la pluviométrie. Elles offrent un intérêt floristique certain, mais n'interviennent que pour modifier temporairement la physionomie végétale des régions, qui sont ordinairement presque totalement dépourvues de végétation.

C'est pourquoi les espèces pérennantes qui se maintiennent grâce à un enracinement puissant, sont beaucoup plus significatives. Elles permettent de caractériser parfaitement les sols sahariens. Aussi font-elles toujours partie du noyau caractéristique des groupements individualisés.

Toutefois, en raison de leur dispersion extrême imposée par les exigences du milieu (sol-humidité), les relevés ont toujours été effectués sur de très grandes surfaces, supérieures à 1 000 m².

RÉGION D'IGLI

Le Centre d'Étude d'Irrigation d'Igli est situé au nord du Poste d'Igli, en rive gauche de la Saoura, dont la vallée orientée du nord-ouest vers le sud-est, est encaissée entre la Hamada du Guir à l'ouest, et le Grand Erg Occidental à l'est. Il a été créé dans le but d'étudier les possibilités agricoles et le comportement à l'irrigation des alluvions de la Saoura ainsi que l'influence des conditions climatiques sur l'évolution des cultures.

I. — La végétation spontanée

Au point de vue phytogéographique, la région appartient au *Secteur marocain oriental*, district de la Hamada du Guir.

Pour Gaussen et Guinet, Igli se trouve dans une zone de passage entre la pseudo-steppe arborée à *Tamarix pauciovulata* et la pseudo-steppe à *Salsola foetida*, qui traduit l'existence d'un substratum sec. La végétation, établie sur des alluvions limono-sableuses ou argilo-limoneuses, sèches et salées, qui ne sont alimentées en eau que par les rares précipitations locales, a toujours un faible degré de couverture : moins de 10 p. 100.

La strate arborescente est constituée par trois espèces :

— *Tamarix gallica ssp. nilotica* ;
— *Tamarix pauciovulata* ;
— *Tamarix Balansae* ;

La première espèce, établie principalement dans le lit mineur de la Saoura, paraît avoir été amenée des régions septentrionales par les eaux de crues.

Au contraire, *Tamarix pauciovulata* et *Tamarix Balansae* sont en place. Mais il semble, tout au moins pour le premier, se trouver en limite nord de son aire d'habitat.

Les tamarix sont installés le plus souvent sur d'énormes coussinets, formés par un amoncellement de sables éoliens et de débris végétaux dont la hauteur peut atteindre 4 à 6 mètres (tchokolaks ou nebkas).

Dans le lit mineur de la Souara, les peuplements de *Tamarix* sont localisés sur les berges. Ils sont extrêmement variables car les crues les submergent et les dégradent considérablement.

Les strates herbacées et sous-frutescentes sont très pauvres en espèces : 8 à 15 selon les saisons. Toutes sont installées sur des coussinets sablonneux d'origine éolienne.

Les éléments représentatifs sont :

— *Zygophyllum album et Zygophyllum Geslini*, qui se trouvent à la limite occidentale de leur aire d'habitat ;

— *Launaea arborescens*, qui constitue de grosses touffes hémisphériques dépassant parfois 1 m de hauteur ;

— *Suaeda mollis*, qui est installée sur des terres argileuses, salées, où l'eau stagne après les pluies ou les inondations ;

— *Salsola foetida* var. *eu-foetida*, qui se développe dans des terrains semblables mais plus secs ;

— *Atriplex halimus*, qui croît en gros buissons dans les stations argileuses ou argilo-limoneuses peu chargées en sels.

— *Traganum nudatum*, qui est établi sur des coussinets en sols argileux, gypso-salins.

— *Zilla macroptera*, qui constitue de grosses touffes, installées dans les sols alluvionnaires sablonneux.

Dix relevés ont permis de dresser le tableau 1 qui caractérise la végétation établie sur les alluvions de la rive gauche de la Saoura entre le confluent du Guir et de la Zousfana au nord, et le poste d'Igli au sud.

Ce groupement répond très précisément à la pseudo-steppe à *Salsola foetida*, signalée par GUINET (loc. cit.) dans la région de Béni-Abbès, et par QUEZEL et SIMONNEAU (loc. cit.) aux environs d'Igli. De même, l'association à *Salsola vermiculata* et *Salsola foetida* décrite sur certains sols gypso-salins du Sahara Sud-constantinois, ne diffère que par la constitution du cortège des espèces compagnes, et il s'agit là indiscutablement de la même unité phytosociologique.

Dans la Saoura, il convient d'ajouter parmi les caractéristiques *Suaeda Monodiana, Randonia africana, Zygophyllum album et Zygophyllum Geslini*, qui n'ont d'ailleurs qu'une valeur locale.

Plus au sud, ces espèces prennent des significations différentes :

— *Randonia africana* s'inscrit plus spécialement dans la sous-association à *Oudneya africana* de l'Association à *Salsola tetragona* et *Zygophyllum Geslini*.

— *Suaeda Monodiana* déborde largement ce groupement à l'ouest de la Saoura où sa signification phytosociologique précise reste encore à établir.

— *Zygophyllum album* et *Zygophyllum Geslini*, au contraire, sont des espèces sahariennes occidentales qui atteignent les limites nord et ouest de leurs aires d'habitat.

De même dans le cortège, les psammophiles sont localement mieux représentés. On trouve en effet :

Pennisetum dichotomum ;
Centaurea pungens ;
Euphorbia Guyoniana ;
Asphodelus refractus ;
Eremobium aegyptiacum ;
Launaea resedifolia ssp. *mucronata*.

Les éléments strictement sahariens occidentaux sont également présents

Battandiera amaena ;
Launaea arborescens.

TABLEAU I

Surface des relevés	1 ha	1 ha	1 ha	1 ha	1 ha	1 ha	1 ha	1 ha	1 ha
Degré de couverture de la végétation	5 %	5 %	6 %	5 %	7 %	5 %	10 %	7 %	6 %
Hauteur moyenne de la végétation	10 cm	10 cm	10 cm	10 cm	12 cm	10 cm	12 cm	12 cm	10 cm
Date des relevés	1954	1955	1956	1956	1957	1957	1958	1958	1958
Caractéristiques de l'association :									
Salsola foetida var. *eu-foetida.*	1 — 1	1 — 1	1 — 1	1 — 1	1 — 1	1 — 1	1 — 1	1 — 1	1 + 1
Salsola vermiculata var. *villosa*	1 — 1	1 — 1	1 — 1	1 — 1	1 — 1	1 — 1	1 — 1	+ — 1	1 + 1
Suaeda Monodiana	1 — 1	1 — 1	1 — 1	1 — 1	1 — 1	1 — 1	1 — 1	1 — 1	1 — 1
Zygophyllum album	+ — 1	+ — 1	+ — 1	+ — 1	+ — 1	+ — 1	+ — 1	+ — 1	+ — 1
Randonia africana	+	+ — 1	+	+	+ — 1	+	+	+	+
Espèces Halo-gypsophiles ou Halo-hygrophiles :									
Traganum nudatum	2 — 2	2 — 2	1 — 1	1 — 1	+ — 1	+ — 1	+	2 — 2	1 — 1
Suaeda mollis	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Tamarix pauciovulata	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Tamarix gallica ssp. *nilotica.*	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Espèces psammophiles :									
Pennisetum dichotomum	+	+	+	+	+	+	+	+ — 1	+
Euphorbia Guyoniana	+ — 1	+	+ — 1	+	1 — 1	+	1 — 1	2 — 2	+
Centaurea pungens	+	+	.	.	+	.	+	+	+
Asphodelus refractus	.	.	+	.	+	.	+ — 1	1 — 1	.
Eremobium aegyptiacum	.	.	.	.	.	.	+	+	.
Launaea resedifolia ssp. *mucronata*	.	.	.	.	+	.	+	.	+
Brocchia cinerea	.	.	.	.	.	.	+	+	+
Malva parviflora	.	.	.	.	+	.	+	.	.
Ifloga spicata	.	.	.	.	+	.	+	.	.
Autres espèces :									
Launaea arborescens	+ — 1	+ — 1	+ — 1	+ — 1	+ — 1	+ — 1	+ — 1	1 — 1	+
Zilla macroptera	+	+	+	+	+	+	+ +	1 — 1	+
Battandiera amoena	.	.	+	.	+	.	+	.	.
Carduncellus oriocephalus	.	.	.	.	+	.	+	.	.
Cynodon dactylon	.	.	.	.	.	.	+	.	+
Microcymbium gramineum	.	.	.	.	.	.	+ — 1	.	.
Bubonium graveolens	.	.	.	.	.	.	+	.	.
Emex spinosus	.	.	.	.	.	.	+	.	.
Pulicaria crispa	.	.	.	.	.	.	+	.	.
Launaea anthoclada	+	.	.	.	.	.	.	.	.
Reseda arabica	.	.	.	.	.	.	.	+	.
Convolvulus sp.	.	.	.	.	.	.	.	+	.
Nombre d'espèces	15	14	15	13	21	13	27	19	17

Dans la vallée de la Saoura, le groupement à *Salsola foetida* et *Salsola vermiculata*, ne représente pas la seule association établie dans les zones salées du lit de l'oued. En effet, une analyse plus précise de la végétation du lit de l'oued entre Igli et Béni-Abbès en particulier, montre que 3 groupements peuvent être reconnus.

Dans le lit mineur de l'oued, sur les alluvions humides fortement chargées en sel, des peuplements de *Salicornia europea* ne sont pas rares. C'est ainsi que les 2 relevés effectués à Touzdit (nº 1) et au gué de Mazer (nº 2) ont les constitutions floristiques suivantes :

Numéros des relevés	1	2
Salicornia europea	1	4
Tamarix gallica ssp. *nilotica*	3	1
Suaeda fruticosa	.	+
Juncus maritimus	1	.
Frankenia pulverulenta	1	.

De même, dans le lit de l'oued, entre les formations à *Salicornia* et la pseudo-steppe à *Salsola foetida* et *Salsola vermiculata*, les peuplements de *Tamarix pauciovulata*, et *Tamarix Balansae*, remplacés au sud par ceux de *Tamarix articulata*, présentent leur développement optimal.

Il s'agit d'un groupement mal défini, pauvre en espèces, dont deux relevés, provenant des mêmes localités, donnent une idée :

Numéros des relevés	1	2
Tamarix pauciovulata	3	4
Moricandia Foleyi	+	1
Suaeda fruticosa var. *longifolia*	1	2
Suaeda Monodiana	1	1
Tamarix Balansae	+	+
Suaeda mollis	—	+
Atriplex Halimus	—	+

C'est donc au moins trois groupements distincts qu'il faudrait individualiser dans les terrains salés de la Saoura :

— Le Groupement à *Salicornia europea* et *Tamarix gallica* ssp. *nilotica*, qui ne sort pas des zones humides du lit mineur ;

— le Groupement à *Tamarix pauciovulata*, *Tamarix Balansae* et *Suaeda fruticosa var. longifolia*, qui colonise plus spécialement le lit majeur ;

— le Groupement à *Salsola foetida* et *Salsola vermiculata* nettement plus xerophile et plus gypsophile, qui se rencontre surtout sur les terrasses marginales.

Cette constatation met en particulier l'accent sur la valeur des trois *Tamarix* qui dans la dernière de ces associations, ne jouent que le rôle de compagnes.

Tamarix gallica ssp. *nilotica*, qui peuple le lit mineur de l'oued, se maintient grâce aux crues et aux apports nouveaux venant d'amont.

Tamarix pauciovulata et *Tamarix Balansae* sont écologiquement en place dans le lit majeur de l'oued. Ils végètent normalement et supportent parfaitement bien une sécheresse prolongée.

En raison du nombre réduit des annuelles, les variations saisonnières de la composition floristique du groupement sont peu importantes. Seule, la forte pluviosité de l'hiver 1957-58 a déterminé un accroissement appréciable du nombre des espèces annuelles.

13 espèces se retrouvent dans tous les relevés, quelle que soit la saison où ils ont été effectués. Ce sont :

1° des halophytes grasses ou succulentes :

Suaeda Monodiana ;
Zygophyllum album ;
Zygophyllum Geslini ;
Suaeda mollis.

2° des halophytes demi-grasses :

Traganum nudatum ;
Salsola vermiculata var. *villosa ;*
Salsola foetida var. *eu-foetida.*

3° des halophytes hygrophiles :

Tamarix gallica ssp. *nilotica ;*
Tamarix pauciovulata ;
Tamarix Balansae.

4° des compagnes de signification variable, établies sur les venues sableuses d'origine éolienne :

Launaea arborescens ;
Euphorbia Guyoniana ;
Randonia africana ;
Zilla macroptera ;
Pennisetum dichotomum.

Pour toutes les espèces, le coefficient Abondance-Dominance varie peu. Cette stabilité témoigne de la parfaite adaptation du groupement végétal individualisé aux alluvions gypso-salines de la Saoura.

***

Le groupement à *Salsola foetida* var. *eu-foetida* et *Salsola vermiculata* var. *villosa* spécifique des alluvions chlorurées, gypseuses et sèches de la partie septentrionale de la vallée de la Saoura, présente des caractères pédologiques très stricts.

Elles ont été étudiées à Igli par DURAND, qui en donne le profil suivant :

Profil S. 380

Longitude W : 2° 11′ 15″
Latitude N : 30° 28′ 25″
Altitude : 500 mètres
(cartes au 1/200 000, Feuille de Béni-Abbès — n° XVI).

1. — *Caractères du Profil*

Type génétique du sol : alluvial ;
Roche-mère : alluviale ;
Origine : fluviatile ;
Érosion : nulle ;
Relief : terrasse alluviale ;
Micro relief : uni ;
État de la surface : polygonale.

2. — *Description du Profil*

Profondeurs en cm	Couleur	Texture	Structure	Consistance Densité	Observations
0-10	brun rougeâtre	limon argilo-sableux	motteuse	friable	sec
10-50	brun rougeâtre clair	limono-sableux	motteuse à polyédrique	plastique	humide
50-80	brun rougeâtre	sablo-limoneux	massive	friable	humide
au-dessous	brun rougeâtre	sablo-limoneux	sans	friable	humide

3. — *Constitution physique* :

Profondeurs	pH	Pour 1 000 g de terre fine sèche							
		Sable grossier		Sable fin	Limon	Argile	Calc. total	Sels solubles par l	Mat. org.
		calc.	total						
0-10	7,8	1	15	640	140	205	54	10	0,10
10-50	7,8	2	70	630	120	180	113	1,65	3,20
50-80	8,0	0	10	800	80	110	98	8,05	0,90
au-dessous de 80	8,0	2	30	800	80	90	97	0,30	0,90

4. — *Éléments de fertilité*

Profondeurs en cm	P_2O_5 ‰	K_2O ‰	N_2O_5 ‰
0-10	0,38	0,88	0,09
10-50	0,36	1,06	0,08
50-80	0,30	0,88	0,07

Le terrain pauvre en azote, est chargé en sels dans l'horizon superficiel (0- 10) et moyen (50-80). La présence de ces couches salifères impose l'installation d'une végétation spécialisée.

Les mêmes caractéristiques se retrouvent dans le profil S 379 où l'analyse physique a donné les résultats suivants :

Profondeur en cm	pH	Pour 1000 g de terre fine sèche							
		Sable grossier		Sable fin	Limon	Argile	Calc. total	Sels solubles par l	Mat. org.
		calc.	total						
0-15	7,9	0	40	705	125	130	0	9,95	0
15-50	7,9	6	160	645	105	90	127	8,80	0,45
50-100	8,6	1	20	950	20	10	27	10,05	0,70

La répartition des sels solubles est plus régulière et la perméabilité du sous-sol est bonne. Le drainage est donc satisfaisant.

Dans deux autres profils : S 377 et S. 378, un horizon argileux apparaît aux profondeurs suivantes :

12 à 40 dans S. 377

50 à 90 dans S. 378

La teneur en sels solubles augmente dans les horizons superficiels, car le drainage en profondeur, vers les couches sableuses se fait très mal :

1° *Profil S. 377 — Constitution physique*

Profondeurs en cm	pH	Pour 1 000 g de terre fine sèche							
		Sable grossier		Sable fin	Limon	Argile	Calc. total	Sels solubles par l	Mat. org.
		calc.	total						
0-12	8,0	6	225	515	100	160	94	19	4
12-40	7,6	1	30	150	340	480	185	15,5	2,4
40-50	7,8	21	450	380	70	100	63	9,70	0,4
50-70	7,7	10	390	520	25	65	30	9,70	0
70-90	8,1	34	520	410	30	40	58	9,70	0
au-dessous de 90	7,9	3	50	465	240	245	206	9,70	0,25

2° *Profil S. 378 — Constitution physique*

Profondeurs en cm	pH	Pour 100 g de terre fine sèche							
		Sable grossier		Sable fin	Limon	Argile	Calc. total	Sels solubles par l	Mat. org.
		calc.	total						
0-20	7,6	4	110	460	180	250	149	19,90	0,50
20-50	7,7	2	25	225	350	370	217	31	1,30
50-90	7,7	1	20	130	290	560	183	7,60	2,05
au-dessous de 90	8,1	14	400	460	30	110	50	10,05	0,25

II. — Les modifications causées par la pratique des cultures irriguées

La mise en culture et la pratique des irrigations ont déterminé des modifications importantes, qui ont été observées dans le Centre d'Étude d'Irrigation où ont été effectués les relevés groupés dans le tableau 2.

TABLEAU 2

Surface des relevés	1 ha	1 ha	1 ha	1 ha	1 ha	1 ha	1 ha	1 ha
Degré de couverture de la végétation	12 %	10 %	10 %	20 %	12 %	20 %	35 %	30 %
Hauteur moyenne de la végétation	12 cm	12 cm	12 cm	15 cm	12 cm	15 cm	15 cm	15 cm
Date des relevés	1955	1956	1956	1957	1957	1958	1958	1958
Vestiges des caractéristiques de l'association à *Salsola foetida* et *Salsola vermiculata* :								
Zygophyllum album	+	+	+	+	+	+	+	+
Suaeda mollis	.	.	.	.	.	.	.	1 — 1
Salsola vermiculata var. *villosa*	.	.	.	.	.	.	+	.
Suaeda Monodiana	.	.	.	.	.	.	+	.
Espèces caractéristiques du groupement à *Suaeda fruticosa* :								
Suaeda fruticosa var. *longifolia*	+	+	+	+ — 1	1 — 1	1 — 1	1 — 1	2 — 2
Cynanchum acutum	+ — 1	+ — 1	1 — 1	1 — 1	1 — 1	1 — 1	1 — 1	1 — 1
Frankenia pulverulenta	+	+	+	+	+	+	2 — 3	1 — 1
Spergularia diandra	.	.	.	.	.	+ — 1	+	.
Espèces caractéristiques des « prés-salés » du Tell oranais :								
Ormenis praecox	.	+	.	+ — 1	.	+ — 1	1 — 1	.
Melilotus indica	.	+	.	+	.	+	+ — 1	+ — 1
Phalaris minor var. *genuina*	.	+	.	+	.	+ — 1	1 — 1	+ — 1
Lolium multiflorum ssp. *Gaudini*	.	+	.	+ — 1	.	+ — 1	1 — 1	+ — 1
Pholiurus incurvus ssp. *incurvatus*	.	+	.	+	.	+	+	
Polypogon monspeliensis	.	+	.	+	.	+	+	.
Melilotus sulcata	.	+	.	+	.	.	+ — 1	.
Autres halophiles et sub-halophiles :								
Spergularia salina	.	+	.	++	.	+ — 1	1 — 1	.
Beta vulgaris var. *maritima*	.	.	.	.	.	.	.	+
Juncus subulatus	.	.	.	.	.	.	.	+
Polygonum patulum var. *virgatum*	.	.	.	.	.	.	+	.
Psammophiles :								
Brocchia cinerea	.	.	.	+	.	+	+	+
Cyperus conglomeratus var. *conglomeratus*	.	+	+	+	+	+	.	.
Launaea resedifolia ssp. *mucronata*	.	+	.	+	.	.	.	.
Anthropo-nitrophiles :								
Chenopodium murale	+	+	+ — 1	+ — 1	+ — 1	+ — 1	+ — 1	+ — 1
Cynodon dactylon var. *genuinus*	1 — 1	1 — 1	1 — 1	1 — 1	1 — 1	1 — 1	2 — 1	1 — 2
Hordeum murinum ssp. *leporium*	.	.	.	+	.	1 — 1	+ — 1	1 — 1
Sonchus oleraceus	+	.	.	+	.	+	+	.
Peganum Harmala	.	.	.	.	+	+	+	+
Sisymbrium Irio	.	.	.	.	.	+	+	.

TABLEAU 2 *(suite)*

Surface des relevés	1 ha	1 ha	1 ha	1 ha	1 ha	1 ha	1 ha	1 ha
Degré de couverture de la végétation	12 %	10 %	10 %	20 %	12 %	20 %	35 %	30 %
Hauteur moyenne de la végétation	12 cm	12 cm	12 cm	15 cm	12 cm	15 cm	15 cm	15 cm
Dates des relevés	1955	1956	1956	1957	1957	1958	1958	1958
Segetales, Ruderales et compagnes :								
Setaria verticillata	+	+	.	.	+	.	.	.
Launaea arborescens	+	.	+	.	+	.	.	.
Anethum graveolens	.	.	.	.	.	+	+	.
Malva parviflora var. *mucronata*	.	.	.	.	.	+	+	+
Vicia monantha	.	.	.	.	.	+	+	.
Medicago sp.	.	.	.	+	.	+	.	.
Vaccaria pyramidata	.	.	.	.	.	+	+	.
Coriandrum sativum	.	.	.	.	.	+	+	.
Launaea glomerata	.	.	.	.	.	+	+	.
Neslia apiculata	.	.	.	+	+	.	.	.
Trisetum pumilum ssp. *eu-pumilum*	.	.	.	+	.	.	.	.
Trigonella anguina	.	.	.	.	.	+	.	.
Medicago laciniata	.	.	.	.	.	+	.	.
Emex spinosus	.	.	.	.	.	+	.	.
Bassia muricata	.	.	.	.	.	+	.	+
Phragmites communis var. *isiacus*	.	.	.	.	.	.	+	+
Trisetum paniceum var. *typicum*	.	.	.	.	.	.	+ — 1	+ — 1
Poa annua ssp. *typica*	.	.	.	.	.	.	+	.
Senecio vulgaris	.	.	.	.	.	.	+	.
Silene rubella	.	.	.	.	.	.	+	.
Trigonella polycerata	.	.	.	.	.	.	+	.
Coronilla scorpioides	.	.	.	.	.	.	+	.
Convolvulus supinus var. *atrichogynus*	.	.	.	.	.	.	.	+
Nombre d'espèces	9	18	8	23	10	32	39	22

Tout d'abord, il faut remarquer que *les arrosages ont été réalisés avec des eaux chargées de sels*. Les analyses faites par DURAND ont relevé une augmentation continue de la salure :

Dates des prélèvements	CE à 25°C en micro mhos	Teneur en méq		
		Ca	Mg	Na
16- 2-1956	2 400	7,8	5,7	13,4
4-1956	3 200	10,7	9	16,5
19- 3-1957	6 000	17	15,9	29,5
23-10-1957	7 400	20,3	18,3	42,2

BOURGEOIS a recherché l'origine de cette salure. Il a montré que dans le puits du périmètre expérimental « ... le niveau hydrostatique quasi stabilisé se situe à 0,75 au-dessous du plan d'eau de la Saoura, à 500 m à l'ouest ».

L'alimentation « ... se fait donc à partir de la Saoura d'une part et de l'erg d'autre part. Du côté Saoura, les circulations sont facilitées par le fait que l'ouvrage se trouve placé dans un ancien lit de l'oued ainsi qu'en témoignent les galets roulés de calcaire viséen, rencontrés dans cette zone ».

L'analyse chimique a permis à BOURGEOIS de calculer le pourcentage d'eau fourni par chacune des deux nappes. En tenant compte des résidus secs, il s'est élevé à 58 p. 100 d'eau de la Saoura et 42 p. 100 d'eau de l'Erg.

En conclusion, les alluvions chlorurées de la vallée de la Saoura ont donc été irriguées avec des eaux dont la salure a régulièrement augmenté.

La mise en culture a provoqué la disparition quasi totale des espèces pérennantes qui ont été détruites au cours des travaux de défrichement, de labours et de nivellement.

Certaines ne se manifesteront plus. Ce sont :

Tamarix gallica sp. *nilotica;*
Tamarix pauciovulata;
Tamarix Balansae;
Traganum nudatum;
Suæda mollis;
Suaeda Monodiana.

D'autres réapparaissent sporadiquement dans les jachères, les tournières et sur les francs-bords des canaux d'arrosage en terre.

Ce sont :

Zygophyllum album;
Zygophyllum Geslini;
Salsola vermiculata var. *villosa.*

Le nombre des espèces, particulièrement des annuelles, augmente considérablement :

9 en 1955 ;
18 en 1956 ;
24 en 1957 ;
33 en 1958.

L'accroissement du nombre des annuelles entraîne d'importantes variations saisonnières de la composition floristique du groupement. Sa richesse optimale se produit en février-mars.

En outre, le degré de couverture, qui était faible en 1955, a augmenté régulièrement pour atteindre 80 p. 100 en 1958.

Le fait le plus remarquable a été l'apparition des *halophytes* caractéristiques des solontchaks humides des plaines sublittorales d'Oranie, elle eut lieu en 1956, année pendant laquelle se sont manifestées pour la première fois :

Suaeda fruticosa var. *longifolia;*
Frankenia pulverulenta;
Cynanchum acutum ;
Spergularia salina.

Toutes ces espèces, halophiles grasses ou demi-grasses, rares et éparses au Sahara septentrional, sont caractéristiques de l'Association à *Suaeda fruticosa* et *Sphenopus divaricatus*, décrites dans les terrains salés du nord de l'Algérie (QUEZEL et SIMONEAU, 1960).

Les compagnes habituelles sont apparues en même temps. Ce sont :

Sphenopus divaricatus;
Pholiurus incurvus ssp. *incurvatus;*
Melilotus indica;
Melilotus compacta;
Ormenis praecox.

Les premières sont aussi caractéristiques de l'Association à *Suaeda fruticosa* et *Sphenopus divaricatus*. Mais elles sont considérées comme des halophiles sèches.

Il s'est donc constitué un groupement végétal particulier caractérisé par :

1° la présence d'*halophiles grasses*, extrêmement rares au Sahara en raison de la sécheresse du milieu.

En mars 1958, il est même apparu dans les jachères qui avaient été arrosées abondamment (pluies et irrigations) de véritables taches salées stabilisées occupées par le faciès à *Frankenia puverulenta* et *Spergularia salina* de la sous-association à *Suaeda fruticosa* :

a) *Parcelle n°* 3

Degré de couverture de la végétation : 95 p. 100
Hauteur moyenne de la végétation : 15 cm
Surface du relevé : 100 m²
Composition floristique :

Suaeda fruticosa	4-4
Frankenia pulverulenta	2-2
Sphenopus divaricatus	+
Melilotus compacta	+

b) *Parcelle n°* 4

Degré de couverture de la végétation : 95 p. 100;
Hauteur moyenne de la végétation : 15 cm;
Surface du relevé : 100 m²
Composition floristique :

Suaeda fruticosa var. *longifolia*	3-3
Frankenia pulverulenta	4-4
Spergularia salina	1-1
Spergularia diandra	+
Melilotus compacta	+
Ormenis praecox	+

c) *Parcelle n°* 7

Degré de couverture de la végétation : 75 p. 100;
Hauteur moyenne de la végétation : 12 cm;
Surface du relevé : 100 m²

Composition floristique :

Frankenia pulverulenta	2-2
Spergularia salina	1-1
Melilotus compacta	+-1
Ormenis praecox	+ -1
Zygophyllum album	+
Suaeda fruticosa	+
Rumex sp.	+

2° la présence d'un *grand nombre d'annuelles*, anthropo-nitrophiles, rudérales et messicoles, qui donnent au groupement végétal son développement optimum pendant les mois de février et de mars.

3° *La régression des psammophytes*. Le travail du sol a détruit les venues sableuses. La mise en culture, en créant une couverture végétale presque permanente, a arrêté l'érosion éolienne. Il s'ensuit que les espèces psammophiles n'ont plus trouvé de formations sablonneuses propices à leur établissement.

III. — Conclusion

Quatre années de pratique des irrigations ont déterminé des modifications importantes dans le groupement végétal halophile spécifique des alluvions gypso-salines, sèches de la rive gauche de la Saoura.

Un groupement halophile, riche et varié, assez semblable aux associations décrites dans les solontchaks humides des plaines sublittorales d'Oranie, s'est installé. L'humidité, constamment entretenue par la pratique des irrigations, a favorisé l'apparition et l'installation des halophiles grasses, caractéristiques de l'Ordre *Salicornietalia* (J. Braun-Blanquet, 1926) et plus spécialement de l'Association à *Suaeda fruticosa* et *Sphenopus divaricatus* (M. Guinochet, 1949). Les compagnes sont devenues très nombreuses. Il s'en est suivi une augmentation considérable du degré de couverture de la végétation, qui, dans certaines stations privilégiées, a pu atteindre les pourcentages enregistrés dans les peuplements du Nord.

Il apparaît ainsi que sous le climat saharien, la présence d'une certaine humidité provoque en sols salins, jusqu'alors secs, l'établissement de groupements halophyles, dont la présence n'avait été signalée que dans les solontchaks, situés au nord de l'Atlas saharien et des Hautes plaines steppiques.

RÉGION DE KERZAZ

Le Centre d'Étude d'Irrigation de Kerzaz a été installé en rive gauche de la Saoura sur l'étroite bande de reg qui s'étend entre le lit majeur de l'oued et le Grand Erg Occidental. L'étude des possibilités agricoles et du comportement des sols à l'irrigation y a été poursuivie de 1954 à février 1958. Le périmètre, dont l'aménagement était alors terminé, a été remis au Poste de Kerzaz pour en faire un jardin potager.

I. — La végétation spontanée

Au point de vue phytogéographique, la région de Tazougar où se trouve le Centre d'Étude d'Irrigation est située à la limite du *Secteur des Grands Ergs* et du *Secteur des Monts d'Ougarta*.

Pour Gaussen et Guinet, il est localisé dans la pseudo-steppe arborée à *Acacia Raddiana* et *Panicum turgidum*, qui correspond au faciès du même nom individualisé par Guinochet et Quezel à propos de l'Association à *Acacia Raddiana* et *Panicum turgidum*.

Les relevés, groupés dans le tableau 3, ont été effectués :

TABLEAU 3

Surface des relevés	1 ha	1 ha	1 ha	1 ha
Degré de couverture de la végétation	3 %	3 %	5 %	5 %
Hauteur moyenne de la végétation	10 cm	10 cm	10 cm	10 cm
Date des relevés	28-11-1954	8-11-1955	17-3-1956	14-3-1956
Zygophyllum album	1 — 1	1 — 1	+ — 1	+ — 1
Fagonia glutinosa var. *genuina*	+	+	+ — 1	+ — 1
Salsola vermiculata var. *villosa*	+	+	+	+
Morettia canescens	+	+	+	+
Pergularia tomentosa var. *viridiflora*	+	+	+	+
Pennisetum dichotomum	+	+	+	+
Aristida plumosa ssp. *lanuginosa*	+	+	+	+
Colocynthis vulgaris	+	+	+	+
Retama Retam	+	+	+	+
Acacia Raddiana	+	+	+	+
Monsonia nivea	.	.	+	+
Moltkia callosa	.	.	+	+
Euphorbia Guyoniana	.	.	+ — 1	1 — 1
Nombre d'espèces	10	10	13	13

Observations : Le nombre d'individus à l'hectare (surface des relevés) s'élève à 1 pour *Acacia Raddiana* et 2 ou 3 pour *Retama Retam*.

Acacia Raddiana atteint 5 à 7 mètres de hauteur.

Retama Retam, très dégradé par les nomades, ne dépasse jamais 1,50 m de hauteur.

1° au moment de l'implantation du périmètre expérimental ;

2° dans les terrains situés autour du périmètre, lorsque la végétation spontanée a été détruite par la mise en culture.

Le groupement végétal, qui occupe les alluvions de la rive gauche de la Saoura dans la région de Tazougar, est donc caractérisé par :

1° Le petit nombre d'espèces qui le constituent : 13 au maximum pendant les périodes les plus favorables de l'année.

2° La rareté des annuelles, imposée par la xérophilie du milieu, particulièrement du sol.

3° La présence constante, dans tous les relevés, de 10 espèces qui sont les mieux adaptées à la sécheresse et à la chaleur. Ce sont :

Pennisetum dichotomum;
Colocynthis vulgaris;
Pergularia tomentosa var. *viridifolia;*
Morettia canescens;
Retama retam;
Aristida plumosa ssp. *lanuginosa;*
Salsola vermiculata var. *villosa;*
Fagonia glutinosa var. *genuina;*
Zygophyllum album.

4° L'extrême faiblesse du degré de couverture de la végétation. En raison de la grande dispersion des espèces, il a fallu augmenter considérablement la surface des relevés. Elle n'a jamais été inférieure à un hectare, qui a été localisé soit en aval, soit en amont du périmètre expérimental et en bordure du lit majeur de la Saoura.

5° La taille de tous les individus, qui souffrent de la chaleur et de la sécheresse du milieu.

L'interprétation phytosociologique de ce groupement est délicate. En effet, des éléments appartenant à des ensembles floristiques divers y cohabitent. Ce sont :

Des vestiges du groupement à *Salosola foetida* et *Salsola vermiculata* décrit plus haut :

Zygophyllum album
Salsola vermiculata

Des espèces plus spécialement psammophiles :

Morettia canescens;
Pennisetum dichotomum;
Colocynthys vulgaris;
Retama Retam;
Monsonia nivea;
Moltkia callosa;
Euphorbia Guyoniana.

Une espèce appartenant à la Savane désertique à *Acacia-Panicum :*

Acacia Raddiana.

Des espèces sahariennes très xérophiles plus ou moins ubiquistes :

Fagonia glutinosa;
Pergularia tomentosa.

Il n'en reste pas moins que l'on peut considérer que les rares *Acacia* proviennent de graines entraînées par l'Oued à partir de peuplements environnants et que les psammophiles, surtout annuelles, sont liées exclusivement à l'horizon sablonneux superficiel. C'est donc en réalité encore les vestiges du groupement à *Salsola foetida* et *Salsola vermiculata* qui paraissent être là le plus à leur place, et caractériser électivement les zones limono-sableuses, faiblement chargées en gypse et en sels minéraux

solubles qui constituent, à Kerzaz, les terrasses sur lesquelles a été installé le Centre d'expérimentation. Tout laisse donc à penser que nous avons à faire ici à un faciès à *Zygophyllum album* de l'association précédente.

Ce groupement à *Zygophyllum album*, dont l'aire d'habitat s'étend jusqu'au sud d'Adrar, paraît avoir à Kerzaz son développement optimal. Plus au sud, en sols moins profonds, il s'appauvrit rapidement. Il arrive même dans de nombreuses stations, au stade final de son évolution : le peuplement pur.

Celui-ci grâce à sa xérophilie, peut alors occuper et se maintenir sur des alluvions légèrement salées : solontchaks inertes de la région d'Adrar.

***

A Kerzaz, le groupement à *Zygophyllum album* est installé sur un terrain alluvial sec, caractérisé par le profil suivant, relevé par DURAND :

Profil S. 373

Longitude W : 1° 28′ 20″
Latitude N : 29° 28′ 400″
Altitude : 500 mètres

(carte au 1/200 000 — Feuille de Kerzaz NH 30 n° 1 (Édition de 1949).

1. — *Caractère du Profil*

Type génétique du sol : éolien d'ablation;
Roche-mère : alluviale;
Origine : secondaire, plus sable;
Érosion : éolienne forte;
État de la surface : sableuse.

2. — *Description du Profil*

Profondeurs en cm	Couleur	Texture	Structure	Consistance Densité	Matières organiques
0-18	brun très pâle	sable	sans	meuble	sec
18-60	brun très pâle	sable	massive	assez dur	nodules calc.
60-100	brun très pâle	sable	massive	assez dur	oxyde de fer en tache

3. — *Constitution physique*

Profondeurs en cm	Cailloux ‰	Graviers ‰	Pour 1 000 g de terre fine sèche								
			pH	Sable grossier		Sable fin	Limon	Argile	Calc. total	Sels sol. par l	Mat. org.
				calc.	total						
0-18	50	30	7,9	9	230	715	35	20	60	0,85	0
18-60	30	20	7,8	14	125	805	40	30	81	0,65	0,15
60-100			8,0	8	110	790	35	65	72	0,55	0

Les alluvions sont sablonneuses, perméables, très peu chlorurées et extrêmement pauvres en matières organiques. Elles sont aussi pourvues en élément de fertilité. Dans les 4 horizons du Profil S. 372, situé en amont du précédent, les quantités suivantes ont été trouvées :

Profondeurs en cm	Couleur	Texture	Sels solubles par l	En ‰		
				P_2O_5	K_2O	N_2O_5
0-12	gris clair	sable	0,7	0,18	0,13	traces
12-45	gris clair	sable	0,85	0,13	0,17	traces
45-75	brun très pâle	sable	2,40	0,15	0,18	0,28
75-110	gris clair	sable	1,25	0,14	0,12	traces

Cependant, l'épaisseur des sédiments meubles, qui se trouvent sous le tapis superficiel continu de cailloux et de graviers constituant le reg, est toujours suffisante pour permettre une mise en culture et la pratique des irrigations. Quelques apports d'engrais, d'amendements et de fumier suffisent pour les rendre fertiles, car le salant est presque totalement inexistant.

II. — Les modifications causées par la pratique des cultures irriguées

La mise en culture a profondément modifié l'aspect végétal de la région.

Toute la végétation spontanée a été totalement détruite sur l'ensemble du périmètre expérimental lors des travaux de labour, de nivellement et d'aménagement du terrain pour la pratique des arrosages.

L'eau utilisée pour les irrigations était excellente. La teneur en chlorures, exprimée en NaCl par litre, a toujours été inférieure à 1 g par litre.

1954 — 28 novembre : 0,355;
1955 — 23 avril : 0,402;
1956 — 20 avril : 0,408;
14 novembre : 0,395;
1957 — 14 mars : 0,409;
22 octobre : 0,407.

Après deux années d'irrigation, assez poussées, quatre espèces, primitivement établies sur le reg, ont réussi à se réinstaller. Ce sont :

Fagonia glutinosa var. *genuina;*
Monsonia nivea;
Moltkia callosa;
Colocynthis vulgaris.

Les relevés groupés dans le tableau 4, montrent la progression du nombre des espèces et la transformation de la végétation. Malheureusement, les observations ont été arrêtées en 1958, lorsque la gestion du périmètre expérimental a été abondonnée par la Direction de l'Hydraulique et de l'Équipement rural.

TABLEAU 4

Surface des relevés	1 ha	1 ha	1 ha
Degré de couverture de la végétation	50 %	60 %	65 %
Hauteur moyenne de la végétation	15 cm	15 cm	15 cm
Dates des relevés	8-11-1955	16-3-1956	14-3-1957
Cynodon dactylon var. genuinus	+ — 1	1 — 1	1 — 1
Sonchus oleraceus	+	1 — 1	1 — 1
Silene apetala	+	1 — 1	1 — 1
Launaea resedifolia ssp. *eu-resedifolia*	+	+ — 1	1 — 1
Chenopodium murale	+	+ — 1	1 — 1
Polypogon monspeliensis	+	+ — 1	1 — 1
Cyperus conglomeratus var. *conglomeratus*	+	+	1 — 1
Launaea arborescens	+	+	+
Colocynthis vulgaris	+	+	+
Monsonia nivea	+	+	+
Moltkia callosa	+	+	+
Fagonia glutinosa var. *genuina*	+	+	+ — 1
Medicago hispida var. *lappacea*	.	+	+
Adonis dentata var. *genuina*	.	+	+ — 1
Randonia africana	.	+	+
Convolvulus arvensis	.	+	+
Linaria spuria	.	+	+
Spergula diandra	.	+	+
Lolium multiflorum ssp. *Gaudini*	.	+	+
Cutandia dichotoma var. *memphitica*	.	+	+
Diplotaxis virgata	.	+	+ — 1
Coriandrum sativum	.	1 — 1	+
Polygonum patulum var. *virgatum*	.	+	+
Oxalis cernua	.	+	+
Salsola foetida var. *eu-foetida*	.	+	+
Peganum harmala	.	.	+
Solanum nigrum	.	.	+ — 1
Brocchia cinerea	.	.	+
Trigonella polycerata var. *vulgaris*	.	.	+
Euphorbia Chamaesyae	.	.	+
Trisetum pumilum ssp. *eu-pumilum*	.	.	+
Danthonia Forskalii	.	.	+
Scandix pecten veneris	.	.	+
Coronilla scorpioides	.	.	+
Launaea glomerata	.	.	+
Nombre d'espèces	12	25	35

Observations : Les deux derniers relevés sont beaucoup plus riches car ils ont été effectués au printemps (mois de mars).

Il est néanmoins possible de constater que l'humidité entretenue en permanence par les arrosages a favorisé l'installation d'un grand nombre d'espèces, principalement des annuelles.

Seules, *Salsola foetida* var. *eu-foetida* et *Spergula diandra* traduisent la présence du salant, qui se trouve localisé dans la région du profil. Ces manifestations sont sporadiques et n'entravent nullement la culture.

Le degré de couverture de la végétation et la taille des individus augmentent. Les messicoles sont assez nombreuses.

III. — Conclusion

Le groupement à *Zygophyllum album* qui occupait les alluvions sablonneuses, très sèches de la rive gauche de la Saoura, en amont de Kerzaz a été complètement détruit par les travaux d'aménagement du périmètre expérimental.

La pratique des irrigations avec des eaux excellentes a entraîné la disparition des espèces xérophiles qui, à l'exception de quatre, n'ont pas réussi à se réinstaller dans les jachères, les tournières et les berges des canaux d'arrosage de la zone irrigable.

Un groupement végétal, riche et varié, constitué principalement par des annuelles est en cours d'établissement. Il peut être considéré comme spécifique des alluvions profondes et saines, relativement humides grâce à la pratique des irrigations.

Les conclusions auxquelles amène l'étude du périmètre de Kerzaz ne diffèrent pas beaucoup de celles qui seront développées plus loin à propos du périmètre d'Adrar, où les choses ont pu être suivies de beaucoup plus près.

RÉGION D'ADRAR

Le centre d'Étude d'Irrigation d'Adrar a été aménagé à l'ouest de l'Oasis dans la région des ouleds Aroussa en vue d'étudier les possibilités de mise en valeur du reg, dont le sol est constitué par un *solontchak inerte*, avec des eaux légèrement chlorurées.

I. — La végétation spontanée

Toute la région était occupée par un peuplement pur de *Zygophyllum album* — *Z. Geslini*, à très faible degré de recouvrement : moins de 3 p. 100. Ce groupement végétal est installé sur un solontchak inerte caractérisé par le Profil S. 361, relevé par Durand et ainsi localisé :

Longitude W : 0° 17′ 55″
Latitude N : 27° 56′ 50″
Altitude : 260 mètres environ.

(carte au 1/200 000 — Feuille d'Adrar NG 30 — n° XXV — Édition 1928-29).

1. — *Caractère du Profil*

Type génétique du sol : éolien d'ablation — solontchak inerte;
Roche-mère : grès continental intercalaire;
Relief : plaine;
Microrelief : un peu bosselé;
Érosion : éolienne forte;
État de la surface : caillouteuse.

2. — *Description du Profil*

Profondeurs en cm	Couleur	Texture	Structure	Consistance	Observations
0-3	brun clair	sablo-limoneux	feuilletée	friable	
3-14	brun clair	sablo-limoneux	massive	friable	sel
14-24	brun clair	sablo-limoneux	massive	friable	
24-35	brun clair	sablo-limoneux	motteuse	friable	
35-65	brun	sablo-limoneux	motteuse	friable	cailloux
au-dessous de 65	gris rosé	sablo-limoneux	massive	dure	

3. — *Constitution physique*

Profondeurs en cm	Cail. ‰	Grav. ‰	pH	Pour 1 000 g de terre fine sèche							
				Sable grossier		Sable	Limon	Argile	Calcaire	Sels solubles par l	Mat. organ.
				Calcaire	Total						
0-3	40	60	8,0	42	390	440	50	120	90	17,95	0,15
3-14	15	20	8,1	8	410	440	65	85	64	21,30	0
14-24	5	10	8,3	23	440	450	25	85	60	24,40	1,35
24-35	50	25	8,2	21	440	410	45	105	52	26,20	0
35-65	36	25	8,1	21	480	380	50	90	57	32,60	1,40
au-dessous de 65	16	16	8,2	21	550	325	45	80	64	15,65	0,15

Dans les profils S. 359 et S. 360, les teneurs en sels solubles, mesurées par résistivité, sont élevées. Elles varient de :

21,40 à 34,50 p. 1 000 dans S. 359 ;
14,85 à 31,25 p. 1 000 dans S. 360.
Le pH est constamment alcalin : 7,8 à 8,3.

1° *Profil S.* 359

Profondeurs en cm	En ‰			
	P_2O_5	N_2O_5	K_2O	Sels solubles par l
0-12	0,19	0,10	0,77	21,40
12-22	0,12	0,335	1,95	34,50
22-45	0,11	0,60	2,23	31,10

2° *Profil S.* 360

Profondeurs en cm	En ‰			
	P_2O_5	N_2O_5	K_2O	Sels solubles par l
0-25	0,27	0,145	1,09	26,85
25-75	0,18	0,06	1,45	31,25

Enfin, la teneur en éléments de fertilité n'est satisfaisante que pour la potasse.

Comme dans tous les sols éoliens d'ablation, le vent a entraîné les particules sableuses de l'horizon superficiel laissant en place les cailloux et les graviers. Ceux-ci, en raison d'une très grande concentration, forment un tapis continu : c'est le reg ou désert-pavement des pédologues anglo-saxons. Ils protègent les sédiments sous-jacents d'une ablation ultérieure.

A Adrar, les sédiments meubles ont une épaisseur suffisante pour permettre une mise en culture par l'irrigation. Malheureusement, la présence du salant stérilise les sols et en augmente l'aridité naturellement très grande.

Zygophyllum album et *Zygophyllum Geslini* sont les plantes caractéristiques du reg (solontchak inerte) de cette région. Ils constituent des peuplements purs, très ouverts, qui sont parfaitement adaptées aux conditions particulières du milieu : xérophilie et halophilie.

D'Adrar à Sba, sur 45 km environ, *Zygophyllum album et Zygophyllum Geslini* sont installés dans les moindres dépressions alluviales. Le degré de couverture des populations est toujours faible : il varie de 3 à 15 p. 100.

Les peuplements les plus denses se rencontrent :

1° à 25 km au nord d'Adrar où les Zygophyllum sont établis sur des coussinets sablonneux mobiles, mesurant un mètre de longueur sur 10 à 50 cm de hauteur. Le substratum, dans lequel plonge l'enracinement du végétal est constitué par un solontchak inerte gypso-salin.

2° à une dizaine de km de Sba et à l'est de la Piste Impériale n° 2 où le peuplepur de *Zygophyllum album* et *Zygophyllum Geslini* occupe une vaste dépression à sol limono-sableux gypso-salin. Le degré de couverture s'élève à 15 p. 100.

Plus au nord, vers l'embranchement de la piste de Timimoun, la pseudo-steppe à *Zygophyllum* croît par taches installées dans des dépressions alluviales. Les coussinets sont toujours très bas ou même inexistants.

II. — Les modifications causées par la pratique des cultures irriguées

Les travaux d'aménagement du périmètre expérimental (sous-solage, épierrement, ment, nivellement, drainage, surfaçage, labours, etc.) ont entraîné la destruction totale du peuplement pur de *Zygophyllum album* et *Zygophyllum Geslini*.

Comme à Igli, les arrosages ont été effectués avec des eaux relativement chargées de sels. Les analyses, faites par Durand depuis le creusement du puits de l'éolienne en 1951, ont relevé des teneurs assez élevées :

Dates des prélèvements	CE à 25°C en micro mhos	Teneur en méq		
		Ca	Mg	Na
15-12-1951	6 900	15,7	4,9	43,3
18- 7-1952	6 500	17,4	11,5	46,7
23- 2-1953	6 100	16,7	10,6	33,8
18- 2-1956	3 700	12,9	8,3	26,9
15- 3-1957	4 800	14,8	10,2	27,8
25-10-1957	4 600	13,1	9,5	30

La mise en culture et la pratique des irrigations ont déterminé l'apparition d'un groupement végétal spécifique de la zone irrigable, qui offre de grandes analogies avec celui des terrains de l'oasis, tandis qu'à l'extérieur du périmètre, les eaux excédentaires provoquaient dans les dépressions du reg une recrudescence de vitalité du peuplement pur de *Zygophyllum album* et *Zygophillum Geslini*. La taille des individus augmentait considérablement. Le degré de couverture s'élevait à 50 p. 100. Enfin, quelques compagnes se manifestaient pour la première fois en 1958 :

Asphodelus tenuifolius ;
Calotropis procera ;
Frankenia pulverulenta.

Le peuplement pur, grâce à l'accroissement de l'humidité, évolue donc vers un faciès du groupement à *Zygophyllum album* et *Zygophyllum Geslini* particulier aux sols salins.

Par contre, dans le périmètre expérimental, cette espèce n'a fait sa réapparition qu'en 1956, soit deux années après l'aménagement. Il se maintient sporadiquement dans les jachères et en bordure des canaux d'arrosage et des drains.

Le tableau 5 où sont groupés les relevés effectués dans le périmètre expérimen-

TABLEAU 5

Surface des relevés	1 ha	1 ha	1 ha	1 ha	1 ha
Degré de couverture de la végétation	10 %	10 %	12 %	25 %	20 %
Hauteur moyenne de la végétation	12 cm	12 cm	15 cm	15 cm	15 cm
Date des relevés	15-3-1957	25-10-1957	5-2-1958	13-3-1958	17-4-1958
Espèces hygrophiles :					
Tamarix gallica ssp. *nilotica*	1 — 1	+	1 — 1	+	+
Agrostis semi-verticillata	1 — 1	+	1 — 1	2 — 2	2 — 2
Adiantus Capillus Veneris	+	.	.	.	.
Espèces halo-gypsophiles :					
Frankenia pulverulenta	1 — 1	.	1 — 1	2 — 2	2 — 2
Zygophyllum album	.	+	+	+	+
Suaeda fruticosa var. *longifolia*	.	+	+	2 — 2	2 — 2
Sphenopus divaricatus	+	.	+ — 1	1 — 1	+
Salsola vermiculata var. *villosa*	.	+	.	+	+
Salsola foetida var. *eu-foetida*	+	+	.	.	.
Spergularia salina	.	.	.	1 — 1	.
Pholiurus incurvus ssp. *incurvatus*					
Espèces halo-hygrophiles :					
Polypogon monspeliensis	1 — 1	+	1 — 1	2 — 2	1 — 1
Lolium multiflorum ssp. *Gaudini*	1 — 1	.	1 — 1	.	1 — 1
Phalaris minor var. *genuina*	+	.	+	1 — 1	1 — 1
Melilotus sulcata	.	.	.	1 — 1	.
Melilotus indica	+	.	+	.	+ — 1
Espèces psammophiles :					
Launaea resedifolia ssp. *mucronata*	1 — 1	1 — 1	1 — 1	1 — 1	1 — 1
Eruca vesicaria ssp. *sativa* var. *aurea*	+	+	+	+ — 1	.
Asphodelus tenuifolius	2 — 2	1 — 1	2 — 2	+	+
Cyperus conglomeratus var. *conglomeratus*	+	.	+	1 — 1	+
Colocynthis vulgaris	.	+	+	.	.
Euphorbia dracunculoides ssp. *Flamandi*	+	+	.	.	.
Cutandia dichotoma var. *memphitica*	.	.	.	1 — 1	.
Catananche arenaria	.	.	.	+	.

TABLEAU 5 (*suite*)

Surface des relevés	1 ha	1 ha	1 ha	1 ha	1 ha
Degré de couverture de la végétation	10 %	10 %	12 %	25 %	20 %
Hauteur moyenne de la végétation	12 cm	12 cm	15 cm	15 cm	15 cm
Date des relevés	15-3-1957	25-10-1957	5-2-1958	13-3-1958	17-4-1958
Espèces anthropo-nitrophiles :					
Cynodon dactylon var. *genuinus*	.	1 — 1	1 — 1	1 — 1	2 — 2
Chenopodium murale	+	.	+	1 — 1	1 — 1
Atriplex dimorphostegia	.	.	+	+	.
Peganum Harmala	+	.	+	+	+
Sisymbrium Irio	.	.	+	.	.
Malva parviflora	.	.	+	.	.
Élément tropical :					
Calotropis procera	.	+	+	+	.
Espèces rudérales, ségétales et compagnes :					
Sonchus oleraceus	+	.	+	.	+ — 1
Coriandrum sativum	+	.	+	+ — 1	+
Avena sterilis	+	.	+	.	.
Oxalis cernua	+	.	+	.	.
Trigonella polycerata var. *vulgaris*	+	.	.	+	+ — 1
Convolvulus arvensis	+	.	.	.	.
Bassia muricata	+	.	.	.	.
Sinapis arvensis	+	.	.	.	.
Tragus racemosus var. *eu-racemosus*	.	+	.	.	.
Euphorbia peplus	.	.	+	.	.
Lepidium sativum	.	.	+	.	.
Adonis dentata	.	.	+	.	.
Cichorium intybus	.	.	.	+	.
Silene setacea	.	.	.	+	.
Nigella sativa	.	.	.	+	.
Anagallis arvensis ssp. *latifolia*	.	.	.	+ — 1	.
Malva nicaensis	.	.	.	+	.
Neslia apiculata	.	.	.	+ — 1	.
Vaccaria pyramidata	.	.	.	+	.
Sinapis arvensis	.	.	.	+ — 1	+
Trigonella foenum-graecum	.	.	.	+	.
Linum usitatissimum var. *humile*	.	.	.	+	.
Galium tricone	.	.	.	+ — 1	.
Lens culinaris ssp. *esculenta*	.	.	.	+ — 1	.
Vicia sativa ssp. *obovata*	.	.	.	+	.
Emex spinosus	.	.	.	+	.
Euphorbia terracina	.	.	.	+ — 1	.
Anethum graveolens	.	.	.	+ — 1	.
Vicia monantha ssp. *eu-biflora* var. *biflora*	.	.	.	+	.
Trisetum pumilum ssp. *eu-pumilum*	.	.	.	+ — 1	.
Convolvulus arvensis	.	.	.	+	.
Leontodon hispidulus ssp. *Mulleri*	.	.	.	+ — 1	.
Daucus Carota ssp. *maximus*	.	.	.	+	+ — 1
Cannabis sativa	.	.	.	+	.
Rapistrum hispanicum var. *hirsutum*	.	.	.	.	+
Avena alba var. *hirtula*	.	.	.	.	+
Bromus rigidus ssp. *maximus*	.	.	.	.	+
Scandix pecten-veneris	.	.	.	.	+
Centaurea riveana	.	.	.	.	+
Nombre d'espèces	25	15	29	47	29

tal, montre l'évolution de la végétation au fur et à mesure du développement de la pratique des irrigations. Le nombre des espèces, particulièrement des annuelles, augmente régulièrement. La hauteur moyenne de la végétation et son degré de recouvrement s'accroissent. Enfin, le groupement végétal a son développement optimal au printemps : en février et mars. Dès le mois d'avril, la chaleur et les vents déterminent sa régression. Seules, se maintiennent les espèces pérennantes.

Les psammophyles et les espèces hydrophiles des berges des canaux d'arrosage se sont d'abord installées :

Asphodelus tenuifolius ;
Agrostis semi-verticillata ;
Polypogon monspeliensis ;
Launaea resedifolia var. *mucronata ;*
Eruca vesicaria ssp. *sativa* var. *aurea ;*
Tamarix gallica ssp. *nilotica.*

Après la première campagne agricole, quelques messicoles sont parvenues à se maintenir. Ce sont :

Lolium multiflorum ssp. *Gaudini ;*
Avena sterilis ;
Sinapis arvensis.

Les halophytes ont commencé à se manifester en 1957, au cours de la troisième année de pratique des irrigations. Les premières espèces, qui sont apparues, sont les suivantes :

Frankenia pulverulenta ;
Sphenopus divaricatus ;
Salsola vermiculata var. *villosa ;*
Salsola foetida var. *eu-foetida ;*
Sueada fruticosa var. *longifolia.*

En outre, les compagnes habituelles des groupements halophiles des solontchaks humides dans les plaines sub-littorales d'Oranie se sont multipliées en mêmes temps. Ce sont :

Phalaris minor var. *genuina.*
Melilotus indica.

La taille de ces espèces spécialisées s'est considérablement accrue. En avril 1958, les individus du genre *Suaeda* mesuraient fréquemment plus d'un mètre de hauteur.

Enfin, les espèces de souche tropicale demeurent rares. Seul, *Calotropis procera*, qui paraît naturalisé dans les terrains anciennement irrigués de l'oasis d'Adrar, est apparu en 1957 dans le périmètre expérimental.

Cassia aschrek, qui appartient au même élément, évolue dans les terrains irrigués en friche de la partie orientale de l'oasis. Il fait partie d'un groupement post-cultural, qui présente de nombreuses analogies avec celui du périmètre expérimental. Toutefois, son halophilie est moins prononcée ainsi que le montre le relevé, effectué le 6 février 1958, lorsqu'il atteint son développement optimal :

Degré de couverture de la végétation : 3 p. 100 ;
Hauteur moyenne de la végétation : 10 cm ;
Surface du relevé : 2000 m^2

Composition floristique :

Asphodelus tenuifolius	2-2
Silene villosa	2-2
Euphorbia granulata var. *glaberrima*	1-1
Plantago psyllium	1-1
Haplophyllum tuberculatum ssp. *vermiculare*	+-1
Heliotropium undulatum ssp. *eu-undulatum* var. *suffruticescens*	+-1
Centaurea pungens	+-1
Cleome arabica	+-1
Launaea glomerata	+-1
Euphorbia dracunculoides ssp. *Flamandii*	+-1
Eruca vesicaria ssp. *sativa* var. *aurea*	+-1
Adonis dentata	+-1
Leontodon hispidulus ssp. *Mulleri*	+-1
Linum usitatissimum var. *humile*	+
Emex spinosus	+
Cassia aschrek	+
Fagonia glutinosa var. *genuina*	+
Amaranthus angustifolius var. *graecizans*	+
Launaea resedifolia ssp. *mucronata*	+
Sphenopus divaricatus	+
Ifloga spicata	+
Peganum Harmala	+
Chrozophora sp	+

La strate arborescente est représentée uniquement par *Phoenix dactylifera*.

N'étant pas irrigué, ce groupement végétal évolue rapidement. Les plantes restent petites. Elles fleurissent et fructifient dès les premières chaleurs puis elles disparaissent.

Le 13 mars 1958, dans la même station, 19 espèces sont seulement retrouvées, et le groupement a les caractéristiques suivantes :

Degré de couverture de la végétation : 2 p. 100 :
Hauteur moyenne de la végétation : 7 cm ;

Composition floristique :

Heliotropium undulatum	+-1
Peganum Harmala	+
Cassia aschrek	+
Calotropis procera	+
Asphodelus refractus	1-1
Adonis dentata	+
Cleome arabica	+-1
Plantago ciliata	1-1
Imperata cylindrica	1-1
Launaea resedifolia ssp. *mucronata*	+
Launaea glomerata	+-1

Euphorbia granulata var. *glaberrima*	+-1
Fagonia glutinosa var. *genuina*	2-2
Euphorbia dracunculoides ssp. *Flamandii*	2-2
Chrozophora sp.	+
Haplophyllum tuberculatum ssp. *vermiculare*	1-1
Fagonia Bruguieri	2-2
Iffoga spicata	1-1
Centaurea pungens	

Ici, l'absence d'éléments halophiles est due :

1° A la nature du sol. Travaillé depuis plusieurs siècles, le terrain s'est amendé. Il a reçu des apports de matières organiques et il s'est peu à peu assaini.

2° A la qualité des eaux d'irrigation. Ces eaux sont parfaitement douces mais, en raison de leur rareté elle sont utilisées parcimonieusement.

Dans le périmètre expérimental au contraire, les arrosages sont fréquents et abondants. Bien qu'utilisant des eaux relativement chlorurées, ils sont effectués dans le but de dessaler les terrains et ils entretiennent une humidité qui permet l'implantation d'espèces halophiles et gypsophiles (*Suaeda fruticosa* var. *longifolia*, *Frankenia kenia pulverulenta*, *Salsola foetida*, *Salsola vermiculata*).

III. — Conclusion

Dans la région d'Adrar comme à Kerzaz, la mise en culture et la pratique des irrigations ont déterminé la destruction totale de la végétation spontanée, qui occupait les sols constitués par un solontchaks inerte.

Le peuplement pur de *Zygophyllum album* et *Zygophyllum Geslini*, très ouvert, a été remplacé par un groupement halophile, assez dense et varié, caractérisé principalement par la présence d'un noyau permanent d'espèces gypso-halophiles spécifiques des solontchaks humides : *Frankenia pulverulenta*, *Salsola vermiculata*, etc.

Toutefois, les compagnes sont moins nombreuses. Certaines, considérées plus au Nord comme préférentielles, ne se rencontrent pas : *Ormenis praecox*, *Spergularia salina*, *Pholiurus incurvus* ssp. *incurvatus*, etc. Cette particulatité paraît due au climat. Malgré l'augmentation de l'humidité causée par la régularité des arrosages, la résistance à la chaleur et aux vents chauds intervient. Seules, les espèces les plus résistantes parviennent à se maintenir.

Mais ici, on est surtout frappé par l'abondance vraiment exceptionnelle des espèces végétales, rudérales et anthropo-nitrophiles. L'importance de ce cortège est due essentiellement à l'installation dans le périmètre de la quasi-totalité de la flore adventice répandue dans l'Oasis d'Adrar. Il n'en reste pas moins que, comme l'un d'entre nous le signalait (Quezel 1961), l'introduction de la plupart de ces espèces liées à l'homme et à ses cultures, dans les oasis du Sahara septentrional, est un phénomène récent. En effet, les botanistes qui ont parcouru ces régions, il y a moins de 15 ans, c'est-à-dire avant l'essor qu'ont connu ces régions à la faveur surtout des prospections minières et pétrolières, ont été frappés par l'absence quasi totale de ce type de flore au Sahara : Maire faisait remarquer que c'était essentiellement à partir de la flore autochtone que s'individualisait au Sahara la flore adventice des Oasis.

Ainsi en 15 ans, les choses ont bien changé, et c'est plus de 50 espèces caractéristiques des cultures et des zones habitées du Tell algérien, qui se sont maintenant répandues au Sahara.

Le phénomène est d'ailleurs le même dans la quasi-totalité des oasis, sauf dans l'oued Rhir, où, en raison de la forte teneur du sol en sels solubles, s'est installé un groupement spécial presque exclusivement dépourvu de ce type de flore.

Dans le M'Zab et au Hoggar par contre, l'évolution s'est faite comme dans la Saoura. Voici, à titre d'exemple un relevé effectué le 10 avril 1960 dans le périmètre de Zelfana :

Espèces halophiles :

Sphenopus divaricatus	2
Frankenia pulverulenta	1
Spergularia salina	1
Suaeda fruticosa	1
Lepturus incurvatus	+

Espèces psammophiles :

Launaea resedifolia	1
Astragalus gyzensis	1
Astragalus pseudo-trigonus	1
Silene villosa	1
Astragalus sinaiticus	
Cutandia dichotoma	+
Eremobium aegyptiacum	+

Espèces prairiales, rudérales, messicoles et anthropo-nitrophiles :

Cynodon dactylon	3
Lolium multiflorum	2
Phalaris brachystachys	1
Polypogon monspeliensis	1
Bassia Muricata	1
Emex spinosus	+
Malva parviflora	+

A El Goléa, et plus spécialement dans le jardin de l'Annexe qui subit des irrigations régulières et importantes, une flore adventice d'une grande richesse a pu s'installer.

Le 16 avril 1960, elle comprenait les espèces suivantes :

Brachypodium distachyum, Briza minor, Phalaris canariensis ssp. *typica, Bromus rigidus* ssp. *Gussonei, Bromus rigidus* ssp. *maximus, Setaria verticillata, Polygonum argyrocoleum, Stellaria media* ssp. *apetala, Silene laxiflora, Silene apetala, Papaver Raeas, Fumaria parviflora, Rapistrum rugosum* ssp. *orientale, Malcolmia africana, Lobularia lybica, Sisymbrium Irio, Hirschfeldia adpressa, Vicia peregrina, Vicia sativa* ssp. *cordata, Melilotus indica, Scandix pecten-veneris, Ridolfia segetum, Torylis nodosa, Anethum graveolens, Oenothera mollissima, Anagallis arvensis, Veronica persica, Plantago lanceolata, Bidens tripartita, Erigeron crispum, Hedypnois rhagadioloides.*

Enfin, en 1954, à Tamanrasset, la flore de l'oasis, n'était alors pratiquement composée que par des espèces autochtones. Un relevé, effectué le 17 avril 1961 dans le jardin de l'Annexe, a montré :

Lolium multiflorum	2
Phalaris minor	1
Eragrostis poaeoides	1
Setaria verticillata	1
Silene laxiflora	1
Bromus Garamas	1
Polygonum argyrocoleum	1
Melilotus indica	1
Fumaria parviflora	1
Vicia sativa ssp. *cordata*	1

CONCLUSION

Les groupements végétaux, qui ont pu être individualisés dans les régions d'Igli, de Kerzaz et d'Adrar avant la mise en culture sont caractérisés, comme toutes les associations décrites au Sahara, par la pauvreté de leur flore, la taille réduite des individus et leur faible degré de couverture.

Le *facteur édaphique* joue un rôle prépondérant : les groupements les plus riches et les plus variés se trouvent toujours dans les lits d'oueds ou les dépressions où les terres sont alluvionnaires et relativement profondes.

L'*humidité* intervient ensuite d'une manière décisive et permet, selon les saisons aux espèces annuelles de se multiplier.

Les groupements végétaux des sebkhas, qui rencontrent les milieux les plus frais, sont moins favorisés, car le salant aggrave la xérophilie. Le nombre des espèces se trouve alors limité aux plus tolérants

Enfin, les groupements les plus pauvres sont localisés sur le reg où les couches sédimentaires meubles manquent souvent d'épaisseur. Le degré de couverture est alors faible et la dispersion des individus est extrême.

Il faut noter encore que, dans les dépressions importantes et dans les anciens lits d'oueds, quelques psammophiles apparaissent. Elles parviennent à pulluler après les périodes pluvieuses.

En bref, les régions visitées sont typiquement sahariennes. L'édifice phytosociologique n'y offre aucune affinité avec la végétation du versant saharien des Hautes plaines steppiques oranaises. Il diffère aussi considérablement de ceux du Sahara oriental et du Hoggar.

La pratique des irrigations a transformé totalement la physionomie végétale de ces zones. L'aménagement des périmètres expérimentaux a permis de vérifier l'observation faite par GUINOCHET et QUEZEL après les pluies. L'arrosage a même provoqué en sols salins l'apparition d'halophiles grasses : *Suaeda fruticosa* var. *longifolia* s'est manifestée à Igli et à Adrar. Or, cette salsolacée n'avait été rencontrée que, très rarement en aval, dans la zone d'épandage du Guir à Abdala.

Non seulement cette espèce, mais une partie du cortège floristique, qui lui est inféodé en Algérie Tellienne, a réussi à s'installer dans les périmètres les plus septentrionaux et particulièrement à Igli. Parallèlement et sans aucun apport de graines, un cortège très important est apparu à la suite de l'irrigation. Il est constitué par des psammophiles ou des compagnes appartenant à la flore autochtone et surtout par des rudérales, des messicoles et des anthropo-nitrophiles dont le recouvrement au bout de quelques années est devenu très important, constituant de la sorte, dans les parcelles laissées en observation, des pâturages localement très riches et persistant pendant plus de la moitié de l'année. Si beaucoup de ces espèces proviennent indiscutablement des zones de cultures voisines, bon nombre d'entre elles sont apparues récemment au Sahara, sans doute à la suite de l'augmentation brutale des relations avec le Nord consécutive à la mise en valeur et à la prospection de cette région.

Ces constatations montrent tout le profit, qui peut être retiré, dans ces régions déshéritées de cette flore pourtant banale dans la constitution de pâturages d'appoint. Certes, c'est avant tout le problème de l'eau et celui des écrans végétaux qui se pose, mais il n'en reste pas moins, que dans les oasis une organisation rationnelle de ce type de végétation pourrait être, au moins dans certains cas, proposée.

Reçu pour publication en février 1962.

SUMMARY

CONTRIBUTION TO THE PHYTOSOCIOLOGICAL STUDY OF THE WESTERN SAHARA. THE EFFECT OF IRRIGATION ON THE SPONTANEOUS VEGETATION

The plant associations in the regions of Igli (*Salsola fætida, Salsola vermiculata*), Kerzaz (*Salsola fætida, Salsola vermiculata* with *Zygophyllum album* facies) and Adrar (*Zygophyllum album, Zygophyllum Geslini*) are, before reclamation, characterized by the poverty of the flora, low degree of soil cover and small size of their plants. They are closely governed by soil and climatic factors especially by moisture conditions. The almost permanently present salinity has a markedly limiting effect.

Irrigation with the saline waters from Adrar and Igli, and with the pure waters from the groundwaters of the western Grand Erg at Kerzaz caused the appearance and establishment of the plant association *Suaeda fruticosa-Sphenopus divaricatus* in the loamy and saline alluvia of the Saoura at Igli, characteristic of the humid solonchaks of the Algerian Tell ; a cultural group, so far unidentified because of the cessation of experiments, occurred on the healthy and deep sandy alluvia along the Erg at Kerzaz ; and the plant association *Salsola fætida, Salsola vermiculata* was established ont the inert solonchaks of the Adrar region, characterized by an exceptional abundance of ruderal and antroponitrophilous vegetal species.

ZUSAMMENFASSUNG

BEITRAG ZUR PHYTO-SOZIOLOGIE DER ÖSTLICHEN SAHARA. DIE WIRKUNG DER BEWÄSSERUNGEN AUF DIE NATÜRLICHE PFLANZENDECKE

Die Pflanzengruppen der Gebiete von Igli (Vergesellschaftung mit *Salosa vermiculata*), Kerzaz (Vergesellschaftung mit *Salsola foetida* und *Salsola vermiculata* mit *Zygophyllum album*) und von Adrar (Reinbevölkerung von *Zygophyllum album* und *Zygophyllum Geslini*) vor der Urbachmachung zeichnen sich durch Armut der Flora, durch schwache Bedeckung und schwachen Wuchs aus. Sie sind in enger Abhängigkeit der edaphischen und klimatischen Faktoren, besonders der Feuchtigkeit. Ausserdem spielt der fast immer vorhandene Salzgehalt eine stark begrenzende Rolle.

Das Bewässern mit Wasser das in Adrar und Igli geladen wurde und Süsswasser des Untergrunds der grossen östlichen Erg in Kerzar förderte die Erscheinung :

1° in den lehmigen und salzigen Flussablagerungen des Tales der Saoura in Igli von Vergesellschaftungen *Suaeda fruticosa* und *Sphenopus divaricatus*, charakteristisch für die feuchten Solontchaks des algerischen Tells.

2° in den tiefgründigen, sandigen und gesunden Ablagerungen am Rande des Ergs, in Kerzaz, einer Pflanzengruppe die infolge Abbruchs der Versuche nicht festgestellt werden konnte.

3° in den trägen Solontchaks der Gegend von Adrar von Vergessellschaftungen *Salsola foetida* und *Salsola vermiculata*, gekennzeichnet durch eine ausserordentliche Fülle ruderaler und anthroponitrophiler Pflanzenarten.

К вопросу социологии растений Западной Сахары — Действие ирригаций на самовозникающую растительность.

П. КЕЗЕЛЬ и П. СИМОННО.

Растительные группировки распознанные в почвах районов ИГЛИ (сообщество с Salsola foetida и Salsola vermiculata), КЕРЗАЗА (со-(сообщество с Salsola foetida и Salsola vermiculata faciès, а также с Zygophyllum album) и АДРАРА (чистые насаждения Zygophyllum album и Zygophyllum geslini) до их окультуривания, характеризуются бедностью флоры, слабостью покрытия почвы и умеренным ростом особей. Группировки эти находятся всецело в зависимости от почвенных и климатических условий и в особенности от процента влажности.

Кроме того почти постоянное присутствие соли играет большую ограничивающую роль.

Проведение ирригации при помощи соленой воды в районах АДРАРА и ИГЛИ, и пресной грунтовой воды фреатического горизонта БОЛЬШОГО ЗАПАДНОГО ЭРГА в КЕРЗАЗЕ, вызвало появление и установку :

1. — в суглинистых и соленых отложениях долины САУРА в ИГЛИ — сообщества с Suaeda fruticosa и Sphenopus divaricatus являющегося характерным для влажных солончаков Алжирского ТЭЛЛЯ.

2. — в глубоких и здоровых песчанных отложениях расположенных по краям ЭРГА в КЕРЗАЗЕ — растительных группировок полностью не распознанных в виду прекращения опыта.

3. — в инертных солончаках АДРАРСКОГО района — сообщества с Salsola foetida и Salsola vermiculata характеризующегося исключительным разнообразием муссорных и антропонитрофильных растительных видов.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Bourgeois M., 1938. Périmètre expérimental de l'H. E. R. à Igli. Étude de la salure de l'eau. *Rapport HER* inédit du 15 février 1938.

Durand J. H., 1956. Note sur les eaux des périmètres du Sahara Occidentale. *Rapport HER* inédit du 26 décembre 1956.

Durand J. H., 1956. Aperçu pédologique de la Station expérimentale d'Igli. *Rapport SCH* inédit du 5 juin 1956.

Durand J. H., Simonneau P., Les périmètres expérimentaux du Sahara occidental. *Terres et Eaux*, n° 31.

Dutil P., 1956. Note sur la mise en valeur du périmètre de la Station expérimentale d'Adrar. *Rapport SCH* inédit du 3 juillet 1956.

Gaussen H., Guinet Ph., 1954. Carte de la végétation de l'Algérie Feuille de Béni-Abbès.

GUINET Ph., 1958. Notice détaillée de la feuille de Béni-Abbès. *Bull. Serv. Carte Phytogéographique, série A, Carte de la végétation,* **3**.

GUINOCHET M., QUEZEL P., 1954. Reconnaissance phyto-sociologique autour du Grand Erg oriental. *Bull. I. R. S.*, **12**, 11-27.

QUEZEL P., 1961. Contribution à l'étude de la flore du Sahara. *Bull. Soc. Hist. Nat. Afrique du Nord*, 5-6.

QUEZEL P., SIMONNEAU P., 1960. Note sur la végétation halophile du Sahara occidental. *Bull. Res. Counc. Israel,* **8** *D.*, nº 34.

SIMONNEAU P., 1959. Centres d'Études d'Irrigation du Sahara occidental. Essais et études de la campagne 1957-1958. *Trav. Sect. Pédologie et Agrologie,* nº 5.

SIMONNEAU P., 1961. Études et recherches agronomiques de la campagne 1958-59 dans les Centres d'Études d'Irrigation du Sahara occidental. *Publ. Serv. Ét. Sci. appl. Hydraul.*

SIMONNEAU P., 1961. Centres d'Études d'Irrigation du Sahara occidental. Études et Recherches agronomiques de la campagne 1959-60. *Trav. Sect. Pédologie et Agrologie,* nº 6.

Ann. agron., 1962, **13** (3), 255-260.

546. 41 : 543

ÉLIMINATION DE L'ACIDE PHOSPHORIQUE POUR LE DOSAGE COMPLEXOMÉTRIQUE DU CALCIUM DES PLANTES

Ruth GROSMAN
Station d'Agronomie,
Centre de Recherches agronomiques du Centre-Est, Dijon (Côte d'Or).

SOMMAIRE

Des essais ont été entrepris d'une part sur des solutions pures, d'autre part sur divers végétaux pour éliminer par l'oxychlorure de zirconium l'acide phosphorique qui gêne le dosage du calcium par complexométrie.

Le dosage du calcium par L'EDTA à l'aide d'indicateur murexide est conditionné, dans les plantes, par la présence d'une quantité variable d'acide phosphorique qui gêne le point de virage. SCHWARZENBACH (1957) dans son étude sur les dosages complexométriques préconisait déjà l'élimination de l'acide phosphorique lorsque celui-ci se trouvait en quantité importante. Diverses méthodes ont été proposées : utilisation des résines échangeuses d'anions (ADAMS et ROUSE, 1957), précipitation et élimination des phosphates par différents réactifs, en particulier sous forme de sel de zirconium, méthode préconisée par M. D. DERDERIAN (1961), et que nous avons expérimentée.

DERDERIAN signale qu'à pH 5,5-6,5 par addition d'oxychlorure de zirconium à la solution de reprise des cendres végétales, l'aluminium et le fer précipitent sous forme d'hydroxydes, l'orthophosphate sous forme de sel insoluble, tandis que l'excès de zirconium s'hydrolyse formant un précipité gélatineux qui entraîne sans doute le reliquat des métaux lourds par adsorption. Cette méthode a donc l'avantage d'éliminer non seulement l'acide phosphorique mais également les métaux lourds.

I. — ESSAIS EN SOLUTIONS PURES

Nous avons opéré dans les conditions indiquées par DERDERIAN : à une solution contenant une quantité fixe de Ca, nous avons ajouté des quantités croissantes de P_2O_5 pour faire varier le rapport P_2O_5/Ca ; après addition de 3 ou 4 gouttes de vert

de bromocrésol, 2 ml d'une solution d'oxychlorure de zirconium à 2 p. 100, de l'ammoniaque au demi jusqu'à virage au bleu, dilution à un volume convenable et filtration, nous avons dosé Ca par complexométrie.

Tous les essais en solution pure ont été acidifiés par 1 ml de HCl au demi avant l'addition de phosphate pour éviter la précipitation de Ca sous forme de phosphate.

1° *Influence de la quantité de* P_2O_5

L'addition d'ammoniaque a été faite sans précaution spéciale et la zone de pH convenable nettement dépassée. Nous avons alors opéré la neutralisation à l'ammoniaque à l'aide du pHmètre.

Lorsque le rapport P_2O_5/Ca atteint 2, P_2O_5 n'est que partiellement éliminé.

TABLEAU 1

Ca introduit (mg)	P_2O_5 introduit (mg)	pH	Ca retrouvé (mg)
10	0	9,3	9,55
—	5	8,3	9,10
—	10	8,3	7,90
—	15	9,0	4,90
	20	7,5	5,60

TABLEAU 2

Ca introduit (mg)	P_2O_5 introduit (mg)	pH	Ca retrouvé (mg)	P_2O_5 retrouvé (mg)
10	0	5,3	10,20	0
—	5	—	10,10	0
—	10	—	9,60	0
—	15	—	9,20	1,75
—	0	4,3	10,10	0
—	5	—	10,10	0
—	10	—	9,95	0,09
—	15	—	9,50	1,50
—	20	—	9,10	8,0

2° *Influence du pH*

Nous avons utilisé le rapport P_2O_5/Ca = 1 (10 mg de Ca et 10 mg de P_2O_5).

TABLEAU 3

pH	Ca retrouvé (mg)	P_2O_5 retrouvé (mg)
1,5	10,15	0,15
3	10,3	0,10
4,5	9,8	0,10
6,5	8,9	0,10
8,5	7,4	0,10

A pH faible, on obtient un chiffre de calcium par excès, tandis qu'à pH élevé, Ca précipite et se dérobe au dosage. Pour tous les dosages suivants, nous avons choisi un pH voisin de 4.

3° *Influence de la quantité d'oxychlorure de zirconium*

D'après le tableau 2, nous voyons que, lorsque le rapport P_2O_5/Ca s'élève, la quantité d'oxychlorure de zirconium apparaît insuffisante. Nous avons donc utilisé des quantités croissantes d'oxychlorure de zirconium pour le rapport P_2O_5/Ca maximum (10 mg Ca et 20 mg P_2O_5).

TABLEAU 4

ml $ZrOCl_2$ à 2 %	pH	Ca retrouvé (mg)	P_2O_5 retrouvé (mg)
1	4,1	9,1	14,20
2	4,1	9,1	6,70
3	4,2	9,0	1,90
4	4,2	8,1	0,35
5	4,2	10,0	0

Il semble donc que 5 ml de solution d'oxychlorure de zirconium à 2 p. 100 représente la quantité adéquate et nous permette d'éliminer entièrement P_2O_5 et de retrouver la totalité de Ca en opérant à pH convenable. C'est ce que nous avons vérifié.

TABLEAU 5

Ca introduit (mg)	P_2O_5 introduit (mg)	pH	Ca retrouvé (mg)	P_2O_5 retrouvé (mg)
10	0	4,2	10,10	0
—	5	—	10,05	0
—	10	—	10,25	0
—	15	—	10,05	0
—	20	—	9,90	traces

II. — ESSAIS SUR DIVERS VÉGÉTAUX

Nous avons choisi des végétaux présentant des rapports P_2O_5/Ca différents. Nous avons opéré sur Dactyle, Fétuque, Luzerne, une graminée indéterminée, et sur diverses graines dont le rapport P_2O_5/Ca est particulièrement élevé : Maïs, Orge, Blé.

2 g de poudre végétale (5 g pour les graines) sont calcinés à 500°C. Après traitement à NO_3H à 10 p. 100 pour hydrolyser les pyro- et méta-phosphates qui ont pu se former au cours de la calcination, la reprise acide des cendres est filtrée sur fiole jaugée de 50 ml ; capsule et filtre sont lavés à l'eau bouillante. Après refroidissement on complète à 50 ml. On prélève 25 ml qu'on introduit dans un becher de 100 ml. On ajoute 5 ml d'une solution d'oxychlorure de zirconium à 2 p. 100 ; on amène à pH 4 en ajoutant goutte à goutte de l'ammoniaque au demi et en vérifiant au pH mètre. Si on a dépassé le pH convenable, on peut revenir en arrière par addition de HCl

environ N/10. On transvase dans une fiole jaugée de 50 ml en rinçant soigneusement le becher, on ajuste à 50 ml ; on filtre, et sur le filtrat on dose Ca et la somme Ca + Mg à l'aide d'une solution de versénate M/100 en présence de murexide pour Ca, et de phtaléine complexon pour la somme Ca + Mg.

Ca et Mg ont été dosés d'autre part sans élimination de P_2O_5. Les résultats sont exprimés en pour cent de matière sèche dans le tableau 6.

TABLEAU 6

Végétaux	P_2O_5	Sans élimination de P_2O_5		Avec élimination de P_2O_5	
		Ca	Mg	Ca	Mg
Dactyle I 1	0,83	0,37	0,16	0,45	0,13
Dactyle II 1	0,80	0,44	0,16	0,55	0,13
	0,83	0,50	0,16	0,54	0,13
	0,77	0,51	0,13	0,54	0,07
Dactyle II 3	0,80	0,50	0,083	0,53	0,14
Dactyle IV 1	0,72	0,50	0,11	0,53	0,15
Fétuque I 1	0,78	1,16	0,14	1,15	0,26
	0,83	1,12	0,17	1,16	0,27
	0,82	1,12	0,19	1,16	0,27
Fétuque III 3	0,81	1,34	0,21	1,34	0,23
	0,77	1,29	0,14	1,32	0,22
	0,80	1,32	0,17	1,35	0,23
Graminée 61	0,53	0,81	0,15	0,82	0,15
	0,52	0,79	0,14	0,81	0,15
	0,54	0,79	0,14	0,81	0,20
	0,51	0,78	0,11	0,82	0,17
Luzerne 61	0,73	1,35	0,24	1,38	0,22
	0,77	1,42	0,23	1,38	0,24
	0,78	1,39	0,26	1,39	0,23
	—	1,33	0,20	1,33	0,22
	0,77	1,39	0,13	1,42	0,24
Graines d'Orge II 1	0,83	0,057	0,013	0,062	0,12
	0,80	0,040	0,069	0,060	0,12
Graines d'Orge IV 4	0,87	0,053	0,019	0,062	0,12
	0,84	0,048	0,013	0,057	0,12
Graines de Maïs VI 4	0,71	0,014	—	0,018	0,12
	0,80	0,013	0,016	0,013	0,09
Graines de Maïs V 3	0,77	0,014	—	0,016	0,12
	0,75	0,011	0,012	0,016	0,13
Graines de Blé P 1	0,90	0,050	—	0,068	0,08
	0,89	0,059	—	0,052	0,14
Graines de Blé P 14 ...	0,88	0,043	—	0,050	0,13
	0,86	0,059	0,022	0,059	0,12

Dans le cas du Dactyle, les chiffres de Ca sont plus élevés après élimination de P_2O_5 ; les pourcentages de Ca sans élimination de P_2O_5 sont donc entachés d'une erreur par défaut.

Pour la graminée 61, les chiffres de Ca sont très légèrement supérieurs après élimination de P_2O_5, mais les différences trouvées sont de l'ordre des erreurs de dosage.

La luzerne 61 et la fétuque présentent des chiffres identiques, que l'on élimine ou non P_2O_5.

Dans le cas des graines où le rapport P_2O_5/Ca est particulièrement élevé, le dosage de Ca présente une difficulté supplémentaire du fait que cet élément se trouve

en quantité très faible ; l'erreur de dosage est donc plus grande, la dispersion des chiffres également.

Pour le dosage de Mg, les chiffres sont dans l'ensemble moins probants. Mg étant obtenu par différence, l'erreur est beaucoup plus grande et les chiffres plus dispersés.

A l'exception du Dactyle pour lequel l'appréciation du virage est particulièrement difficile, une grande habitude permet de doser correctement Ca et Ca + Mg sans éliminer P_2O_5, ce qui se vérifie pour la Fétuque, la graminée 61 et la Luzerne. Dans les graines, le dosage de Ca et Mg est moins pratiqué.

En conclusion, il est indispensable d'éliminer P_2O_5 dans le cas du Dactyle ; pour les autres végétaux, cette élimination est recommandée bien qu'elle nécessite une manipulation supplémentaire et augmente la durée du dosage ; mais elle présente le grand avantage de faciliter l'appréciation du virage dans le dosage complexométrique de Ca et Mg. Les changements de teinte sont plus francs, la zone de virage beaucoup moins étalée, par suite le dosage gagne en facilité et précision.

Reçu pour publication en mars en 1962.

SUMMARY

REMOVAL OF PHOPHORUS IN THE COMPLEXOMETRIC DETERMINATION OF CALCIUM IN PLANTS (ANALYTICAL NOTE)

The study of the removal of phophorus in the complexometric determination of calcium in various plants showed that this is necessary for Dactylis and cereals, and advisable for plants possessing a P/Ca ratio lower than 1.

The method described utilizes Zirconium oxychlorur as the removing agent, improving the precision of determinations.

ZUSAMMENFASSUNG

ELIMINIERUNG DER PHOSPHORSAURE ZW. KOMPLEXOMETRISCHER BESTIMMUNG DES KALZIUMS DER PFLANZEN (ANALYTISCHE MITTEILUNG)

Es wurde die Eliminierung der Phosphorsäure zw. komplexometrischer Bestimmung des Kalziums verschiedener Pflanzen untersucht und im Falle Knaulgras und Samen als notwendig befunden ; sie wird für Pflanzen mit einem Verhältnis P_2O_5 : Ca > 1 empfohlen.

Es wird eine Methode für Verwendung von Zirkon-Oxychlorid als Eliminierungsmittel beschrieben.

Die betreffende Methode erhöht den Wert und die Genauigkeit der Bestimmung.

Отстранение фосфорной кислоты при комплексометрическом дозаже извести в растениях.

Рут ГРОСМАН (Дижон).

Отстранение фосфорной кислоты при комплексометрическом дозаже извести в различных растениях было изучено автором, который нашел что оно необходимо для дозажа извести в еже и в зернах; оно рекомендуется также для растений у которых соотношение P205/Ca меньше единицы.

Автор описывает затем метод применения хлорокиси Циркония в качестве агента отстранения. Метод этот улучшает как качество, так и точность дозажа.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ADAMS F., ROUSE R. D., 1957. Use of an anion exchange résine to éliminate anion interference in calcium détermination by flame photometry *Soil Sci.*, **83**, 305-312.

DERDERIAN M. D., 1961. Determination of calcium and magnesium in plant material with EDTA *Anal. Chem.*, **33**, 1796-1798.

SCHWARZENBACH G., 1957. Die complexometrische titration — Die chemische analyse. **45**, 65 — Enker Verlag Stuttgart.

Ann. agron., 1962, **13** (3), 261.

CHRONIQUE DES LIVRES

A COMMITTEE OF THE DIVISION OF TROPICAL PASTURES, C. S. I. R. O., AUSTRALIA. — A REVIEW OF NITROGEN IN THE TROPICS WITH PARTICULAR REFERENCE TO PASTURES (SYMPOSIUM). (Revue des problèmes posés par l'azote en zone tropicale, en particulier en ce qui concerne les prairies pâturées (symposium). Commonwealth Bureau of Pastures and Field Crops, Hurley, Berks, 1962, Bull. nº 46, 185 p.

En 1960, une réunion à laquelle participaient 150 chercheurs australiens se tenait sous les auspices du C. S. I. R. O., à Brisbane. L'objectif de cette réunion était essentiellement de faire le point des connaissances existant sur le sujet : rôle de l'azote dans l'agriculture tropicale et subtropicale.

Une partie des communications présentées à cette occasion fait l'objet de ce volume, divisé en cinq chapitres principaux comportant chacun plusieurs exposés :

I. — Problèmes généraux posés par l'économie de l'azote :

Processus d'apports d'azote au système plante-sol.
Les pertes en azote du système plante-sol.
L'azote dans les associations végétales naturelles.
Consommation en excrétions d'azote dues aux ruminants, à la pâture.

II. — L'azote du sol :

Aspects physiologiques et biochimiques de la nitrification et de la dénitrification.
Les transformations de l'azote dans le sol, autres que la dénitrification.

III. — L'azote des végétaux :

Absorption et transformation de l'azote par les végétaux.
Les effets de carences nutritionnelles sur le métabolisme de l'azote.

IV. — La fixation de l'azote :

Biologie de la fixation de l'azote.
Influence de la nutrition sur la fixation d'azote et la croissance des Légumineuses.

V. — Quelques aspects des relations azote-productions végétales :

Rôle des Légumineuses dans les pâtures à base d'associations Graminées-Légumineuses.
L'utilisation des engrais azotés dans les pâtures des zones tropicales et subtropicales.
Les besoins azotés des cultures de céréales et de fourrages, en particulier au Queensland.

D'intéressantes références sont résumées dans ces exposés et des directions de travail y sont définies.

J. Re.

SEIFERT A. — COMPOST. London, Faber and Faber, 1961, 124 p.

Traduction anglaise de la 2e édition allemande (1957) de l'ouvrage de A. SEIFERT sur la fabrication et l'utilisation des composts. Cet ouvrage fait appel aux principes de l'école biodynamique. Il décrit la préparation de composts essentiellement à partir des résidus de l'exploitation suivant la technique étudiée par l'auteur, et expérimentée depuis plus de 10 ans. L'ouvrage s'adresse avant tout aux praticiens, horticulteurs notamment, et présente un certain nombre de résultats, sans être à proprement parler un traité scientifique. Il est certain, et l'auteur le reconnaît lui-même, que diverses idées présentées dans ce livre ne seront pas admises partout (par exemple, le rôle décisif du compost dans la prévention des maladies parasitaires des plantes).

S. T.

ANNALES

AGRONOMIQUES

vol. 13 - 1962 - n° 4 -

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

Ann. agron., 1962, **13** (4), 265-324.

631. 46 (213)

CONTRIBUTION A L'ÉTUDE DE LA DYNAMIQUE MICROBIENNE DES SOLS EN ZONE SEMI-ARIDE ET EN ZONE TROPICALE SÈCHE (1)

PREMIÈRE PARTIE

Y. DOMMERGUES

Centre de Pédologie de l'O. R. S. T. O. M, Hann-Dakar (Sénégal).

PLAN DU MÉMOIRE

INTRODUCTION

I. CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES SUR LES MÉTHODES D'INVESTIGATION

II. FIXATION DE L'AZOTE ATMOSPHÉRIQUE PAR L'*Azotobacter chroococcum*

III. MINÉRALISATION DE L'AZOTE DANS LE SOL

IV. CYCLE DU CARBONE

V. CYCLE DU SOUFRE

VI. CYCLE DU PHOSPHORE

VII. INTERACTION DES CYCLES DU CARBONE ET DE L'AZOTE

VIII. RÔLES RESPECTIFS DE LA MICROFLORE BACTÉRIENNE ET DE LA MICROFLORE FONGIQUE

IX. ÉVOLUTION DE LA STABILITÉ STRUCTURALE

X. INTERPRÉTATION GÉNÉRALE DES RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

XI. ÉVOLUTION DE L'ACTIVITÉ BIOLOGIQUE AU COURS DU DESSÈCHEMENT DU SOL EN PLACE

XII. ÉVOLUTION DE L'ACTIVITÉ BIOLOGIQUE DU SOL EN SAISON SÈCHE SOUS L'INFLUENCE DES APPORTS SECONDAIRES D'HUMIDITÉ

CONCLUSIONS.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.

ANNEXE : MÉTHODES ANALYTIQUES UTILISÉES.

---

(1) Thèse soutenue à la Faculté des Sciences de l'Université de Paris le 23 mai 1962, pour obtenir le grade de Docteur ès Sciences naturelles.

INTRODUCTION

La dynamique microbienne des sols en zone semi-aride et en zone tropicale sèche est dominée par les facteurs température et eau, ce dernier constituant incontestablement l'élément écologique essentiel. Pendant la saison sèche qui, en zone tropicale sèche, dure 5 à 7 mois et peut se prolonger, en zone subaride, jusqu'à 9 ou 10 mois et plus, les horizons superficiels du sol se dessèchent progressivement. Quand, au cours de ce dessèchement le pF du sol (1) atteint le seuil 4,2 les plantes supérieures parviennent, pour la plupart, au *point de flétrissement permanent*. Quel est alors le sort de la microflore tellurique ? Devient-elle rapidement inactive ou, au contraire, se maintient-elle encore à un niveau d'activité relativement élevé lorsque le pF dépasse la limite 4,2 ?

Effectivement, il découle des travaux effectués jusqu'à présent :

a) que le point de flétrissement permanent ne semble pas constituer, pour la microflore tellurique, un seuil au-delà duquel toute activité cesse ;

b) que les exigences minima en eau des différents groupements de microorganismes semblent assez variables.

Mais il s'agit là de résultats trop dispersés pour pouvoir en dégager les règles générales du comportement de la microflore du sol aux faibles humidités. C'est cette lacune que nous avons essayé de combler en effectuant les recherches dont les résultats sont exposés dans le présent mémoire.

A. — Travaux antérieurs

Une revue détaillée de la littérature mondiale révèle l'existence d'un assez grand nombre de travaux relatifs à l'influence de l'humidité sur le comportement de la microflore du sol. Mais, en général, l'étude des faibles humidités n'a été abordée qu'incidemment et ne porte qu'exceptionnellement sur les sols des zones semi-arides ou tropicales sèches.

C'est incontestablement le *cycle de l'azote* qui est le mieux connu. Dès 1920, Greaves et Carter, travaillant sur les sols de l'Utah, montrèrent que l'ammonification apparaît même lorsque l'humidité est inférieure au point de flétrissement permanent (50). Puis Russel, Jones et Bahrt (1925) utilisant toujours les sols d'Amérique du Nord (Nebraska) constatèrent que la nitrification est insignifiante lorsque l'humidité du sol est maintenue au niveau du coefficient d'hygroscopicité mais qu'elle se développe avec l'humidité croissante jusqu'à un niveau correspondant au moins à une fois un quart l'humidité équivalente, humidité maximum atteinte par ces auteurs dans leur expérimentation (102).

Des résultats comparables furent obtenus plus récemment (1947) par Novogrudsky dans des sols semi-désertiques d'U. R. S. S. Cet auteur remarqua, en effet, que la nitrification cesse lorsque le sol « renferme seulement de l'eau hygroscopique » mais que « la formation de nitrates est très active lorsque l'humidité atteint une fois et demie l'hygroscopicité maximum » (95).

(1) La définition du pF sera rappelée au début du chapitre I consacré à une revue rapide de quelques notions fondamentales concernant l'état de l'eau dans le sol.

Mêmes constatations en Afrique Orientale, où J. B. D. ROBINSON (1957), opérant sur un sol ferrallitique, nota également que la nitrification de l'azote naturel du sol s'annule lorsque l'humidité s'abaisse au-dessous du point de flétrissement permanent. Mais ROBINSON, poursuivant plus loin que ses prédécesseurs l'analyse des processus de minéralisation de l'azote dans le sol, compara les phénomènes d'ammonification et de nitrification et prouva que, si la nitrification s'arrête au point de flétrissement permanent, l'ammonification peut se poursuivre — bien qu'avec une intensité plus faible — à un taux d'humidité compris entre 5/6 et 2/6 du point de flétrissement permanent (100). Ces résultats furent confirmés en 1959 à Yangambi (Congo) où MEYER nota qu'après une pluie, « avec l'élévation de température et la dessiccation progressive, la nitrification s'arrête rapidement tandis que l'ammonification continue et l'azote ammoniacal s'accumule » (88).

Dans une communication au septième Congrès de la Science du Sol (1960), nous avons montré que le décalage entre le seuil d'ammonification et le seuil de nitrification se retrouvait aussi dans les sols de l'Ouest africain et nous avons présenté les premiers résultats de nos déterminations de seuils de minéralisation de l'azote, dans trois sols de cette région (39).

Les processus de dénitrification aux faibles humidités ont été étudiés incidemment par WIJLER et DELWICHE dans les sols Yolo d'Amérique du Nord. Ces auteurs n'ont observé aucun phénomène de dénitrification au-dessous du point de flétrissement permanent (122).

On est moins bien renseigné sur l'influence des faibles humidités sur les processus intervenant dans *le cycle du carbone*. Toutefois il convient de mentionner les observations de JONES sur les variations saisonnières du taux de carbone dans les sols du Soudan. Se basant sur l'accroissement de la fréquence des fluctuations du carbone dans le sol en saison sèche, cet auteur estime que cette période de l'année serait caractérisée par une intense activité biologique (65).

Nos premières recherches dans ce domaine ont été consignées dans une note présentée à l'Académie des Sciences de Paris en 1959 où nous mettions, pour la première fois, en évidence des décalages importants entre les niveaux des seuils de la cellulolyse, de l'amylolyse et de la glucolyse, et où nous en envisagions les conséquences sur l'immobilisation des éléments minéraux ou la minéralisation de la matière organique (34).

La *sulfoxydation* aux faibles humidités est mieux connue depuis les travaux de MOSER et OLSON, d'où il résulte que ce processus peut apparaître dans les sols relativement secs. Ces auteurs signalent même qu'à la station expérimentale agricole de l'Oregon on aurait observé l'oxydation biologique du soufre dans des sols secs à l'air (92).

L'école russe, en particulier RYBALKINA et KONONENKO, publie depuis 1956 les résultats de ses recherches sur l'influence de l'humidité *sur l'importance relative des différents groupes de la microflore*. C'est ainsi que, dans un sol salé à alcali, lorsque l'humidité passe de la capacité de rétention au champ au niveau du point de flétrissement, le nombre des Bactéries diminue considérablement, alors que celui des Champignons et des Actinomycètes augmente dans de fortes proportions (104).

De leur côté, DOBEREINER et ALVAHYDO travaillant sur le même sujet au Brésil, ont montré qu'il peut y avoir une augmentation importante de la population bactérienne ou fongique en passant de l'état sec à l'air au niveau du point de flétrissement, les résultats variant beaucoup d'un type de sol à l'autre (32).

***

Il n'est pas sans intérêt de rapprocher de ces résultats ceux des recherches effectuées dans le domaine de la transmission des maladies cryptogamiques et celui de la conservation des denrées alimentaires. Comme il serait fastidieux et sans grand intérêt, pour le but que nous poursuivons, de faire une revue, même rapide, de la très abondante littérature concernant ces problèmes, on se contentera de signaler quelques résultats mentionnés par SEMENIUK dans l'ouvrage intitulé « Storage of cereal grains and their products » édité par ANDERSON et ALCOCK (106). D'après cet auteur, les besoins minima en eau des Champignons, exprimés en humidité relative de l'atmosphère, sont compris entre 65 p. 100 (*Aspergillus echinulatus*) et 100 p. 100. Les chiffres les plus bas relevés pour les Bactéries sont de l'ordre de 85 p. 100, ces microorganismes n'intervenant en général qu'à partir de 90 p. 100. Il en résulte que les Champignons sont, dans les stocks de grains ou de produits dérivés, des agents de détérioration particiulièrement actifs lorsque l'humidité relative est inférieure à 90 p. 100, à condition bien entendu, que la température et la concentration en oxygène soient suffisantes. Lorsque l'humidité relative s'élève, les Bactéries jouent un rôle aussi important que les Champignons. Toutefois les Bactéries peuvent se développer, même lorsque l'humidité relative est inférieure à 90 p. 100, si l'eau de métabolisme des Champignons provoque la formation de poches d'humidité plus élevée.

***

Les premières recherches fondamentales sur les besoins en eau des microorganismes, qui remontent à 1898 (125), n'ont pas été poursuivies régulièrement ou l'ont été avec des méthodes peu appropriées. Ce n'est qu'en 1950 que fut publié par BURCIK, après huit ans d'expérimentation, une des meilleures études sur ce problème (19). Cet auteur a calculé systématiquement, pour 17 Bactéries (50 souches) et 11 Levures (14 souches), l'humidité relative minimum nécessaire à leur développement. Cette humidité est comprise entre 90 et 99 p. 100 pour les Bactéries testées et 88 à 94 p. 100 pour les Levures qui apparaissent comme nettement moins exigeantes. En conclusion de son travail, BURGIK propose la classification écologique suivante :

a) *Espèces hygrophiles :* début d'inhibition du développement dès que l'humidité relative est inférieure à 99 p. 100, avec un minimum supérieur à 95 p. 100.

b) *Espèces xérotolérantes :* début d'inhibition du développement à partir de 98 p. 100, avec minimum inférieur à 95 p. 100.

c) *Espèces xérophiles :* optimum de développement inférieur à 98,5 p. 100, début d'inhibition à 95 p. 100, avec minimum souvent bien inférieur à 90 p. 100.

Cette classification ne tient compte que des conditions hydriques : lorsqu'on se trouve en présence de modifications de la tension osmotique, soit par un produit chimique neutre, soit par un électrolyte, il faut compléter ces notions *d'hydrophilie* par celles *d'osmophilie* ou *d'halophilie.*

B. — OBJECTIFS ET LIMITES DE LA PRÉSENTE ÉTUDE

Nos connaissances concernant le comportement des microorganismes telluriques aux faibles humidités sont, on le voit, assez sommaires et très disparates. Le but du présent travail a été de reprendre systématiquement à la base et de développer les

recherches dans ce domaine. On s'est efforcé plus particulièrement de déterminer les exigences minima, vis-à-vis du facteur eau, des principaux groupements de micro-organismes et de préciser l'allure des processus d'origine biologique se déroulant aux humidités voisines ou inférieures au point de flétrissement permanent.

Cette étude supposait, au préalable, la mesure aussi précise que possible des caractéristiques hydriques des sols soumis à l'expérimentation. C'est pourquoi il s'est avéré nécessaire de faire appel conjointement à plusieurs méthodes dont les résultats se recoupaient : méthode hygroscopique, méthode cryoscopique, presse à membrane, centrifugation et méthode biologique de détermination du point de flétrissement permanent du Tournesol.

Elle impliquait, en outre, la mise au point d'une technique valable d'enrichissement et de préparation des échantillons de sol suivant des gammes d'humidité parfaitement définies.

Ce n'est que lorsque ces deux problèmes ont été résolus de façon satisfaisante, qu'il a été possible d'analyser les processus microbiens se déroulant aux faibles humidités.

Le sol est un milieu très complexe essentiellement caractérisé par sa micro-hétérogénéité. On pourrait donc envisager l'étude des microréactions à l'échelle de l'agrégat ou de la particule de matière organique. Tel n'est pas notre but. Ce sont les processus à l'échelle de l'échantillon de quarante à cent grammes qui ont été examinés et analysés par des méthodes biochimiques d'une part, et par des méthodes microbiologiques d'autre part. Dans le premier cas, on s'est limité à la mise en évidence des phénomènes de minéralisation ou d'immobilisation d'éléments minéraux, tels que nitrates, sulfates, phosphates, intervenant directement dans l'alimentation des plantes supérieures, sans se préoccuper des étapes intermédiaires. Dans le deuxième cas, on s'est appuyé très souvent sur la notion très féconde de groupements physiologiques, sans chercher à étudier le comportement des espèces bactériennes ou fongiques isolées. Loin de nier l'intérêt des recherches sur la physiologie ou sur la biochimie des souches pures, nous estimons que l'étude des populations bactériennes mélangées — « mixed bacterial populations » de certains auteurs de langue anglaise — doit passer en priorité. Cette méthode de travail est d'ailleurs conforme aux principes de la microbiologie écologique définie par WINOGRADSKY qui, en 1947, écrivait que le « fonctionnement de la microflore ne devait pas être envisagé comme la somme des activités individuelles, mais comme le travail d'un collectif autoréglable » (123).

D'après NORMAN, « au cours des 25 dernières années, un des progrès réellement significatifs dans la compréhension des processus se déroulant dans le sol, a été constitué par la mise en évidence de l'interdépendance des cycles du carbone et de l'azote, des cycles du carbone et du phosphore, des cycles du carbone et du soufre, etc. En d'autres termes, il ne peut y avoir décomposition sans synthèse concomitante, ou il ne peut y avoir désassimilation sans assimilation concomitante » (94). Aussi nous a-t-il semblé indispensable de compléter l'étude des phénomènes de minéralisation dans le cadre de chacun des grands cycles biologiques, par celle des processus d'immobilisation résultant de l'interaction entre ces cycles. Dans ce travail, nous nous sommes volontairement limité aux interactions entre les cycles du carbone et de l'azote.

La microflore tellurique n'intervient pas uniquement dans les processus de transformation de la matière organique, ou de libération ou d'immobilisation d'éléments nutritifs nécessaires aux plantes supérieures ; elle peut aussi modifier certaines carac-

téristiques physiques des sols et plus particulièrement leur structure. C'est pourquoi il est apparu nécessaire de consacrer un chapitre à ce problème qui, jusqu'à présent, n'a, malgré son importance, été abordé que trop rarement par les microbiologistes du sol.

A chaque fois que cela a été possible, les phénomènes biologiques ont été examinés d'un point de vue cinétique. On ne peut, en effet, en écologie microbiologique, dissocier le facteur temps du ou des autres facteurs. Mais, pour des raisons matérielles, on a dû souvent réduire le nombre des mesures dans le temps, afin d'effectuer toujours un nombre de répétitions assez élevé pour permettre une analyse statistique correcte.

Afin d'élargir la portée de notre étude expérimentale, nous avons systématiquement testé chacun des représentants des grands types pédologiques existant dans la zone subaride et dans la zone tropicale sèche de l'Ouest africain.

CHAPITRE PREMIER

CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES SUR LES MÉTHODES D'INVESTIGATION

A. — Rappel de quelques notions fondamentales concernant l'état de l'eau dans le sol. Établissement des courbes de pF

1. — *Notions d'abaissement d'énergie libre et de pF, notion de tension*

Dans l'étude des rapports du sol et de l'eau, les deux grandeurs auxquelles on se réfère sont, d'une part le taux d'humidité, d'autre part l'énergie libre de l'eau du sol.

Le taux d'humidité du sol — exprimé en pourcentage de la terre séchée à 105°C — est une donnée indispensable dans certains cas, notamment pour évaluer d'une façon absolue la quantité d'eau présente dans une épaisseur donnée de terre, soit encore, par différence, la quantité d'eau extraite de ce sol. Mais cette grandeur ne renseigne nullement sur la disponibilité de l'eau du sol pour les plantes supérieures ou la microflore. C'est ainsi qu'on peut voir « les végétaux flétrir dans une tourbe contenant 40 p. 100 d'eau et demeurer turgescents dans un sable contenant 10 p. 100 d'eau. Du point de vue physiologique, on doit considérer comme humide le sable à 10 p. 100 et comme sèche la tourbe à 40 p. 100 d'humidité » (52). Pour exprimer la plus ou moins grande facilité du sol à céder l'eau qu'il retient, il est nécessaire d'adjoindre à la notion de taux d'humidité une autre notion : la notion *d'abaissement d'énergie libre* de l'eau liée au sol par rapport à l'eau libre.

Cet abaissement d'énergie libre ΔF est attribuable, d'une part aux phénomènes de capillarité et d'adsorption, d'autre part aux phénomènes d'origine osmotique. Comme la valeur de ΔF s'élève très rapidement dans le domaine des faibles humidités, au lieu du chiffre ΔF lui-même, on utilise souvent son logarithme que l'on désigne par le *symbole pF*, ΔF étant exprimé en g. cm /g.

On vient de rappeler que l'eau est liée au sol par des mécanismes différents. En pratique, ces liaisons sont mises en évidence par des méthodes diverses qui sont à l'origine d'une terminologie assez complexe. C'est ainsi que, par exemple, on a tendance à considérer, comme eau retenue dans les capillaires, celle que l'on met en évidence par un tensiomètre et à considérer, comme eau retenue par les phénomènes osmotiques, celle dont le point de congélation se trouve abaissé. C'est dans cet esprit que nous serons amené à parler de *tension capillaire* ou de *tension osmotique*, tensions dont la résultante est souvent désignée, par les auteurs de langue anglaise, sous l'expression de *total moisture stress*.

La tension de l'eau du sol peut s'exprimer en g/cm². On utilise aussi souvent comme unité le bar ainsi que l'atmosphère. Une tension d'une atmosphère corres-

pond à 1 033 g/cm² dans les conditions normales ; mais, pour l'établissement de la table d'équivalence entre les pF et les tensions exprimées en atmosphères (tableau 1), on a arrondi à 1 000 le facteur de conversion, cette appromixation étant très suffisante dans la pratique.

TABLEAU I

Table d'équivalence entre les valeurs du pF et de la tension d'eau dans le sol exprimée en atmosphères (kg/cm²).

pF	Tension en atmosphères	pF	Tension en atmosphères
0	1/1 000	4,6	40
1	1/100	4,7	50
2	1/10	4,8	63
2,7	1/2	4,9	79
3,0	1	5,0	100
3,7	5	5,1	125
3,8	6	5,2	158
3,9	8	5,3	200
4,0	10	5,4	251
4,1	12	5,5	316
4,2	16	5,6	398
4,3	20	5,7	501
4,4	25	6,0	1 000
4,5	32	7,0	10 000

Notre travail ayant pour objet l'étude des processus se déroulant aux faibles humidités, on a renoncé à exprimer les résultats directement en fonction de l'abaissement d'énergie libre ou de la tension de l'eau, car les chiffres correspondants auraient présenté des variations trop importantes. On a donc adopté la notation en pF, dont la conversion en tensions exprimées en atmosphères est d'ailleurs immédiate grâce à la table d'équivalence (tableau 1). Toutefois, à l'occasion de certaines synthèses, on a donné les résultats à la fois en pF et en tensions en atmosphères.

2. — *Point de flétrissement permanent*

Le point de flétrissement permanent ou pourcentage de fanaison permanente est « le taux d'humidité qui détermine la limite inférieure en eau à laquelle peut être porté un sol donné, sans risquer de faire subir à une plante déterminée, des dommages irréversibles. Cette grandeur est définie sur une base biologique, contrairement à la capacité de rétention et à l'humidité équivalente, qui sont des constantes physiques... On considère généralement que le pF 4,2 correspond à l'humidité du sol au pourcentage de fanaison permanente. Il s'agit là d'une valeur moyenne qui ne peut pas être extrapolée à tous les végétaux et à tous les sols. Mais en pratique, l'erreur sur le pourcentage d'humidité correspondant à la fanaison permanente ne saurait être appréciable » (101). C'est le Tournesol qui est, en général, utilisé au laboratoire pour la détermination du point de flétrissement permanent. Cette plante a l'avantage de donner une indication très nette du point de flétrissement et les résultats sont très reproductibles (82).

3. — *Établissement des courbes de pF en fonction du pourcentage d'humidité.*

La traduction des pourcentages d'humidité en pF suppose l'établissement préalable de courbes de pF précises pour chacun des sols examinés. Dans les sols utilisés ici, on a pu négliger la tension osmotique. C'est pourquoi, pour la construction des courbes de pF, il a été possible d'utiliser, sans correction, la technique de tension de vapeur, la technique des membranes et la cryoscopie.

a) *Technique des tensions de vapeur (ou hygroscopique).*

Pour les pF élevés, compris entre 5,6 et 4,9, on a adopté la méthode d'équilibre statique qui consiste à laisser les échantillons de sol en contact, dans des exsiccateurs avec des atmosphères à humidité relative réglée par solutions saturées (tableau 2).

TABLEAU 2

Humidité relative de l'atmosphère et tension de l'eau dans le sol en équilibre avec des solutions saturées.

	Humidité relative à 30°C	Tension en atmosphères	pF approximatif
Chlorure de sodium	74,7 %	415	5,6
Chlorure de potassium	83,7 %	254	5,4
Phosphate monoammonique	92,0 %	119	5,1
Phosphate disodique	94,8 %	76	4,9

L'inconvénient majeur de cette méthode est d'exiger une très longue période pour atteindre l'équilibre. Aux humidités étudiées, il est nécessaire de laisser les sols en contact pendant 6 semaines à une température aussi constante que possible (30 ± 1°C). On a admis que la variation du pF en fonction du pourcentage d'humidité H, entre les pF 5,6 et 4,2, était représentée par une droite. On a donc calculé, pour chacun des sols, l'équation de la droite

$$pF = aH + b$$

à partir des chiffres obtenus par la méthode d'équilibre statique. L'humidité au point de flétrissement permanent, c'est-à-dire au pF 4,2 (tension de 16 atmosphères), a été déterminée par extrapolation à partir de ces équations. L'expérience a montré que, dans tous les cas, le pourcentage d'humidité ainsi calculé correspondait, à l'erreur expérimentale près, au pourcentage d'humidité mesuré directement sur le sol au moment du flétrissement des plants de Tournesol (tableau 14).

b) *Presse à membrane de* RICHARDS.

La presse à membrane de RICHARDS a été utilisée pour l'établissement des courbes entre les pF 4,0 et 2,7. On a observé encore ici une concordance satisfaisante entre les résultats de détermination de l'humidité au point de flétrissement par la méthode de tension de vapeur, la méthode du Tournesol et la méthode de la presse à membrane (tableau 14).

c) *Méthode cryoscopique.*

On n'a utilisé cette méthode qu'à titre de référence, dans l'intervalle de pF 4,0 3,0 et pour trois sols seulement. Ces trois sols ont été choisis de sorte que leurs caractéristiques physiques correspondent à trois niveaux de richesse en argile :

— sol ferrallitique KA très argileux (32 p. 100 d'argile) ;

— sol d'argile noire tropicale TH argileux (24 p. 100 d'argile) ;

— sol d'argile noire tropicale PT relativement moins argileux (19 p. 100 d'argile).

Pour tenir compte de l'erreur due au fait que la mesure n'a pas été effectuée à l'équilibre thermique, on a appliqué au pF la correction arbitraire de — 0,06 préconisée par certains auteurs (101). On a admis que, dans l'intervalle de pF 4,0-3,0 où l'on opérait, la fonction pF = f(H), H représentant le pourcentage d'humidité, était linéaire et on a établi les équations des droites pour ces trois sols. On a ensuite calculé par extrapolation le pourcentage d'humidité au pF 4,2.

Il ressort du tableau 3 qu'il existe une concordance satisfaisante entre les chiffres de pourcentage d'humidité au pF 4,2 calculés par les différentes méthodes : méthode hygroscopique, méthode de la presse à membrane, méthode cryoscopique et méthode biologique (flétrissement de jeunes plants de Tournesol). On remarquera toutefois que la méthode cryoscopique donne des résultats un peu trop élevés et la méthode hygroscopique des résultats un peu trop faibles par rapport à la méthode biologique.

TABLEAU 3

Détermination comparée de l'humidité au point de flétrissement par la méthode cryoscopique, la méthode hygroscopique, la méthode de la presse à membrane et la méthode biologique (Tournesol).

Type de sol	Référence	Équation de la droite établie par cryoscopie	Humidité au pF 4,2			
			Extrapolation méthode cryoscopique	Extrapolation méthode hygroscopique	Presse à membrane	Tournesol
Sol ferrallitique.....	KA	pF = — 0,149H + 6,59	16,0	15,2	15,0	15,9
Sol d'argile noire tropicale.....	TH	pF = — 0,087H + 5,30	12,6	11,5	12,2	12,1
Sol d'argile noire tropicale.....	PT	pF = — 0,093H + 4,93	7,9	7,6	8,1	7,8

d) *Centrifugation.*

On a déterminé pour tous les sols l'humidité équivalente qui n'est autre que le taux d'humidité d'échantillons soumis à une force centrifuge de 1 000 g (g étant l'accélération due à la pesanteur). Le pF théorique du sol soumis à une centrifugation de 2 440 tours/minute est de 3,0 ; en fait l'expérience a montré qu'il était plutôt de l'ordre de 2,7. C'est ce dernier chiffre qui a été adopté ici.

B. — Principe des méthodes d'investigation

Le principe des techniques expérimentales utilisées pour l'étude du comportement de la microflore tellurique aux faibles humidités est simple.

On prépare une gamme d'échantillons de sol à des humidités échelonnées depuis l'état sec à l'air jusqu'à une humidité légèrement supérieure à celle qui caractérise le point de flétrissement permanent. En outre, afin de constituer une base de référence pour les fortes humidités, on ajoute une série d'échantillons amenés à l'humidité équivalente. Tous ces échantillons, après un équilibre de 7 jours, sont enrichis ou non en substances métabolisables. Avant et après une incubation d'une durée variable, on effectue, soit des dosages quantitatifs ou qualitatifs portant sur les métabolites eux-mêmes (glucose, amidon, tyrosine, etc.) ou sur les produits du métabolisme (NH_3, NO_3, CO_2, etc.), soit des numérations des différents groupements de microorganismes.

En fait, l'application de ces méthodes s'est heurtée à certaines difficultés théoriques et pratiques que nous examinerons successivement.

C. — Techniques de préparation des gammes d'échantillons de sols a humidités échelonnées

La gamme d'échantillons à humidités échelonnées entre l'état sec à l'air et une humidité légèrement supérieure au point de flétrissement permanent peut être préparée suivant l'une ou l'autre des trois techniques suivantes :

a) Dessèchement de plus en plus poussé d'échantillons préalablement humidifiés.

b) Humidification des échantillons par adjonction directe d'eau suivie d'un malaxage.

c) Humidification des échantillons par mise en équilibre dans des enceintes fermées où l'humidité relative est maintenue à des niveaux bien déterminés.

1. — *Dessèchement des échantillons préalablement humidifiés*

La technique adoptée consiste à amener des échantillons à une humidité approximativement égale à une fois et demi celle du point de flétrissement et, après un équilibre de 48 heures dans un récipient étanche, à les faire dessécher en les agitant constamment. En arrêtant la dessiccation à différents stades, on obtient une gamme d'échantillons à humidités échelonnées. Pour les humidités correspondant à un degré hygrométrique inférieur à 84 p. 100, il est recommandé de faire la dessiccation dans des étuves hygrométriques réglées à différentes humidités.

Cette méthode a été utilisée à titre de référence puisqu'elle se rapproche du processus de dessèchement au champ. Mais elle est longue et fastidieuse et nous lui avons préféré la méthode d'humidification.

2. — *Humidification des échantillons par adjonction directe d'eau suivie d'un malaxage*

L'établissement de l'échelle d'humidification est très simple lorsqu'on connaît l'humidité au point de flétrissement de chaque sol étudié. Si l'on se fixe à 4 le nombre des points intermédiaires à déterminer entre l'humidité du sol sec à l'air (H*a*) et

l'humidité du sol au point de flétrissement (H*f*), l'apport élémentaire d'eau (H*e*) a pour valeur

$$He = \frac{Hf - Ha}{5}.$$

L'échelle d'humidification s'établit donc comme suit :

$$H_0 = Ha$$

$$H_1 = Ha + \frac{Hf - Ha}{5}$$

$$H_2 = Ha + \frac{Hf - Ha}{5} \times 2$$

$$\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots$$

$$H_5 = Ha + \frac{Hf - Ha}{5} \times 5$$

Les pF obtenus sont de l'ordre de grandeur de 5, 7 —5,3 — 5,0 — 4,7 —4,4 — 4,1.

Comme l'humidification a toujours été faite sur des échantillons de sol qui étaient en équilibre avec une atmosphère caractérisée par une humidité relative sensiblement constante de 72 p. 100, l'échantillon le plus sec dans chaque gamme expérimentale a donc eu un pF de 5,7.

En réalité, pour simplifier les manipulations, le chiffre H*e* a été arrondi de sorte que les pF des échantillons humidifiés s'écartent des valeurs moyennes 5,3 — 5,0 — 4,7 — 4,4 — 4,1, ce qui ne présente aucun inconvénient car la valeur exacte des pF, pour chaque humidité et pour chaque sol, a été ensuite recalculée à partir des équations figurant au tableau 14.

Lorsqu'on humidifie directement les échantillons, on fait suivre le malaxage d'une mise en équilibre de 7 jours afin de permettre à l'eau de diffuser uniformément dans toute la masse. C'est après cet équilibre que l'on procède à l'enrichissement. La validité de cette méthode est prouvée par le fait que, lors des expériences sur la disparition de substances métabolisables (glucose, amidon, tyrosine), on observe bien une *disparition totale* de ces substances, si la durée d'incubation est suffisamment longue et si l'on s'est placé au-dessous de seuil. Si l'humidification n'était pas homogène, certaines zones de l'échantillon auraient une humidité trop faible pour permettre l'activité biologique et il resterait encore, à la fin de l'expérience, une certaine quantité de la substance incorporée. Il est à noter que, pendant la période d'équilibre de 7 jours, il y a, surtout aux humidités les plus élevées, une évolution de la microflore ou de la teneur du sol en différents produits du métabolisme résultant de l'activité de cette microflore ; il en est tenu compte systématiquement, puisqu'à chaque échantillon enrichi correspond un témoin qui n'a reçu aucun apport supplémentaire.

3. — *Humidification des échantillons par mise en équilibre avec une atmosphère à humidité relative fixe*

L'inconvénient majeur de l'humidification directe suivie de malaxage pourrait résider dans le fait que la structure de l'échantillon est considérablement modifiée. En réalité, cette perturbation ne s'est pas révélée gênante pour la plupart des proto-

coles expérimentaux car le malaxage, tel que nous le pratiquons, ne détruit pas les pores de très petit diamètre qui seuls interviennent dans la zone d'humidité étudiée.

Par contre, pour l'étude de l'évolution de la stabilité structurale en liaison avec l'activité biologique du sol aux faibles humidités, il a été nécessaire d'utiliser la technique d'équilibre des échantillons avec une atmosphère à humidité relative fixée par une solution saturée. On reviendra sur la description de cette technique au chapitre IX.

4. — *Comparaison de la méthode de dessèchement et de la méthode d'humidification*

On sait que, par suite du phénomène d'hystérésis, à un même pF, correspond une humidité plus élevée dans le cas de la dessiccation que dans celui de l'humidification (30). On a cherché à évaluer l'importance du phénomène d'hystérésis au pF 5,1. Pour deux sols, la différence d'humidité observée est très faible et n'est d'ailleurs significative qu'avec une probabilité P = 0,05 (tableau 4).

TABLEAU 4

Importance du phénomène d'hystérésis après un équilibre de 7 jours avec une atmosphère d'humidité relative fixée à 92 % (pF = 5,1).

Référence	Teneur en eau du sol dans le cas		A	
	de dessèchement	d'humidification	P = 0,05	P = 0,01
PT	5,22	5,08	0,12	0,18
SOR-130-II	2,75	2,41	0,34	0,51

TABLEAU 5

Comparaison des deux méthodes de préparation de la gamme d'humidités échelonnées.

Nature du seuil	Sol		Humidité % au niveau du seuil dans le cas		Différence
	Type	Réf.	de dessèchement	d'humidification	
Cellulolyse (une semaine d'incubation)	Argile noire tropicale	TH	10,69	10,17	— 0,52*
	Sol ferrugineux tropical lessivé	DH	1,78	1,80	+ 0,02
Cellulolyse (deux semaines d'incubation)	Argile noire tropicale	TH	10,50	10,04	— 0,46*
	Sol ferrugineux tropical lessivé	DH	1,75	1,66	— 0,09

*Seules sont significatives, et seulement pour P = 0,05, les différences marquées d'un astérisque.

L'incidence du phénomène d'hystérésis sur la détermination de l'humidité au niveau des seuils a été vérifiée dans le cas de la cellulolyse avec deux durées d'incubation suivant la technique décrite au chapitre IV, par. D. Les résultats de cette expérience de contrôle, qui figurent au tableau 5, montrent qu'il y a effectivement, pour l'un des sols testés (TH), une différence d'humidité au niveau des seuils de

cellulolyse ; mais cette différence n'est significative que pour P = 0,05. Quant à l'autre sol (DH), on n'observe aucune différence significative entre le cas de dessèchement et celui de l'humidification.

L'erreur que l'on commet en ne tenant pas compte de l'hystérésis est négligeable par rapport à l'erreur expérimentale dans le cas des sols à faible rétention hydrique du type DH. Elle est un peu plus élevée dans le cas des sols à forte rétention hydrique du type TH ; mais elle n'est alors significative que pour P = 0,05 et non pour P=0,01.

5. — *Auto-humidification*

L'eau de métabolisme — metabolic water des auteurs de langue anglaise — qui se forme au cours de la dégradation des substances incorporées ou préexistant naturellement dans le sol, peut contribuer dans une certaine mesure à accroître le pourcentage d'humidité du sol, permettant ainsi une accélération des processus biologiques qui pourrait être sensible dans les sols pauvres en colloïdes argileux et humiques. Nous n'avons pu vérifier cette hypothèse, sans doute parce que les quantités de substances énergétiques ajoutées aux échantillons de sol étaient trop faibles.

D. — Enrichissement des échantillons

1. — *Nécessité de l'enrichissement*

Il est parfois possible de mettre en évidence, après l'incubation, des modifications de l'activité biologique ou de certaines caractéristiques chimiques dans des échantillons de sol simplement humidifiés. Mais, en général, ces modifications sont trop faibles ou seulement de l'ordre de grandeur de la précision des méthodes de dosage, de sorte qu'il apparaît nécessaire de procéder à des enrichissements avec les substances dont on étudie le métabolisme. D'autre part, le sol peut ne pas renfermer, ou ne renfermer qu'à dose trop faible, ces métabolites. Il est évident que l'enrichissement est, encore dans ce cas, indispensable.

2. — *Inconvénients de l'enrichissement*

On peut, par contre, objecter que l'enrichissement perturbe profondément à la fois le milieu physique et le milieu biologique.

Norman estime que trop d'expériences en microbiologie du sol ont été conduites à des niveaux énergétiques anormalement élevés alors que la microflore du sol est caractérisée, en général, par un niveau relativement bas (94). Nous répondrons à cette critique qu'assez souvent le sol se trouve spontanément placé à des niveaux énergétiques relativement élevés, soit dans les horizons supérieurs, soit au niveau des racines des plantes ou dans la zone d'enfouissement des résidus des récoltes. Dans les sols forestiers, il est classique d'observer en surface un enrichissement considérable portant à la fois sur la matière organique et les éléments minéraux (75, 77, 87).

Lors de l'incorporation au sol d'une matière organique étrangère, une interaction peut apparaître entre la décomposition de la matière organique préexistant dans le sol et celle de la matière organique ajoutée. C'est ainsi que Henin rappelle qu'on a prouvé, au moyen du C^{14}, qu'un apport de matière organique fraîche entraîne une réactivation de l'humus ancien préexistant dont la décomposition subit un

nouveau départ (58). Pour éliminer cette interaction, on peut imaginer la substitution au sol d'un support artificiel tel que le sable lavé (8). Mais nous estimons que cette façon de procéder est trop artificielle et s'éloigne par trop de l'esprit dans lequel

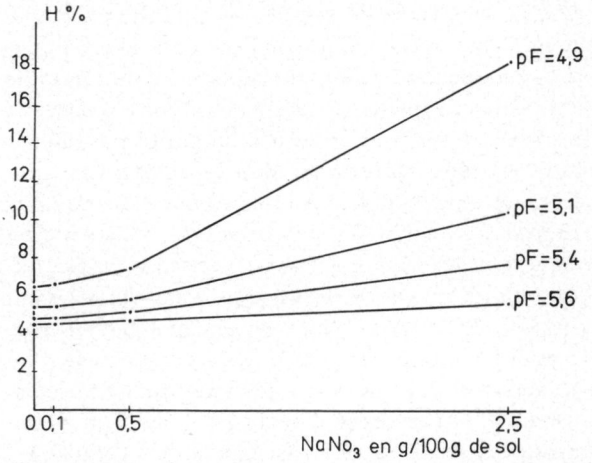


FIG. 1. — *Influence de l'adjonction de doses croissantes de nitrate de potassium sur la teneur en eau (H %) d'un sol d'argile noire tropicale (BAN) après un équilibre de 7 jours sur des solutions saturées destinées à amener le pF à 4 niveaux différents.*

TABLEAU 6

Influence de doses croissantes d'enrichissement en nitrate de sodium sur la teneur en eau d'échantillons d'argile noire tropicale en équilibre avec des atmosphères à humidité relative de 74,7 %, 83,7 %, 92,0 %, 94,8 %.

Humidité relative de l'atmosphère	pF du sol	Dose de nitrate de sodium	Pourcentage d'humidité	A	
				P = 0,05	P = 0,01
74,7 %	5,6	0 0,1 % 0,5 % 2,5 %	4,47 4,47 4,65 5,83	0,16	0,22
83,7 %	5,4	0 0,1 % 0,5 % 2,5 %	4,85 4,81 5,05 6,91	0,14	0,19
92,0 %	5,1	0 0,1 % 0,5 % 2,5 %	5,51 5,53 5,96 10,50	0,36	0,52
94,8 %	4,9	0 % 0,1 % 0,5 % 2,5 %	6,46 6,62 7,43 18,19	0,35	0,49

a été conçu notre travail. D'autre part, les sols de l'Ouest africain, notamment dans les zones subarides, sont, pour la plupart, pauvres en matière organique (tableau 15), de sorte que cette interaction peut être négligée. Même lorsqu'elle est relativement importante, elle ne peut avoir que peu d'influence sur le niveau des seuils.

Plus grave est l'objection relative aux modifications du milieu physique. En effet, l'apport dans le sol de substances minérales ou organiques solubles entraînent un accroissement sensible de la tension osmotique. Ainsi l'adjonction à un sol d'argile noire tropicale (BAN) de nitrate de sodium se traduit, pour une même humidité, par un accroissement de la tension globale de l'eau dans le sol qu'il est facile de mettre en évidence par la technique des tensions de vapeur (figure 1 et tableau 6). Cet accroissement de tension, dans l'expérience que nous avons montée, est d'autant plus important que le sol se trouve à un niveau d'humidité plus élevé et que la concentration en sel soluble est plus importante. Mais on remarquera que, pour des teneurs en nitrate de sodium de 1 pour mille, l'accroissement observé est inférieur à l'erreur expérimentale. *On peut donc négliger l'accroissement de tension globale si les enrichissements en substances sont effectués à des doses suffisamment faibles.*

Il ne faut pas oublier qu'en outre, lorsque la substance soluble est facilement métabolisable (glucose, saccharose, etc.), sa teneur a tendance à diminuer rapidement au cours de sa dégradation, de sorte que l'accroissement de tension osmotique, provoqué par son incorporation au sol, s'atténue progressivement.

Ayers et Campbell ont souligné d'autre part que, lorsque la concentration des substances dissoutes devient élevée mais, si l'on se place dans la gamme des faibles humidités, le facteur osmotique acquiert, dans ces conditions, une faible importance vis-à-vis des autres facteurs de rétention (6).

Quoiqu'il en soit, il faut reconnaître que certains des enrichissements adoptés ici ont entraîné parfois une augmentation de la tension globale qui, bien que souvent faible ou très faible, ne doit pas être passée sous silence. Fort heureusement l'erreur résultante lorsqu'elle existe, joue dans un sens tel que les seuils sont décalés vers des humidités plus élevées, de sorte que les chiffres que nous avançons correspondent toujours à des pF minima.

3. — *Enrichissement en sels minéraux*

Les sols d'Afrique Occidentale utilisés dans la présente étude sont caractérisés, en général, comme beaucoup de sols tropicaux, par une grande pauvreté en éléments minéraux nécessaires à la nutrition de la microflore. Aussi, avons-nous jugé nécessaire d'ajouter systématiquement aux substances étudiées un mélange minéral apportant les macroéléments indispensables à leur métabolisation.

La méthode respirométrique met bien en évidence l'effet très favorable, sur l'activité biologique globale, d'un mélange minéral azoté. Ce fait déjà signalé par divers auteurs dont Waksman et Gerretsen (119), Olson et Mc Calla (96), pour des taux d'humidité voisins de l'humidité équivalente, a été vérifié au niveau du point de flétrissement sur deux sols de l'Ouest africain : un sol ferrugineux tropical peu lessivé, mal tamponné, de pH 5,3 (DIOR-61) et d'un sol d'argile noire tropicale assez bien tamponné de pH 6,2 (PT-61). Dans ce but, on a comparé le dégagement d'anhydride carbonique dans des échantillons enrichis ou non en une matière énergétique (cellulose ou amidon), avec et sans l'apport minéral azoté (MN) suivant exprimé en mg pour 100 g de sol :

Mélange minéral SI	15 mg
Nitrate de potassium	75 mg
Carbonate de calcium précipité	100 mg

la composition du mélange minéral SI étant la suivante :

Phosphate monopotassique	50,000 g
Carbonate de magnésium	25,000 g
Chlorure de sodium	25,000 g
Carbonate de fer	0,500 g
Carbonate de manganèse	0,500 g
Soufre sublimé	0,300 g

Les résultats de cette expérience rassemblés au tableau 7 confirment ceux qui avaient été obtenus antérieurement à des humidités plus élevées.

TABLEAU 7

Influence de l'apport d'un mélange azoté (MN) sur le dégagement de gaz carbonique dans deux types de sol maintenus au pF 4,2.

Type de sol	Humidité		Enrichissement	pH en fin d'expérience			mg CO_2/100 de sol g/7 j		
	H %	pF		sans MN	avec MN	A (P = 0,05)	sans MN	avec MN	A (P = 0,05)
Sol ferrugineux tropical non lessivé (DIOR-61).	1,1	4,2	Aucun	5,32	7,70	0,13	3,3	28,6	7,1
			Amidon (0,5 %)	4,85	7,62	0,13	32,9	141,2	7,1
			Cellulose (0,5 %)	5,20	7,65	0,13	8,8	27,5	7,1
Argile noire tropicale (PT-61).	9,7	4,2	Aucun	6,12	6,97	0,19	18,7	16,2	7,7
			Amidon (0,5 %)	6,22	7,27	0,19	118,2	250,5	7,7
			Cellulose (0,5 %)	6,42	7,07	0,19	29,2	52,0	7,7

C'est ainsi que, dans le cas de l'enrichissement en cellulose, l'adjonction du mélange MN multiplie le dégagement de CO_2 par deux (sol PT-61) ou même trois (sol DIOR-61). On notera que l'effet de l'apport minéral complémentaire est d'autant plus marqué que le sol traité est, à l'origine, moins bien pourvu en réserves minérales ; ce fait explique que le sol ferrugineux tropical non lessivé (DIOR-61) réagit plus nettement encore que le sol d'argile noire tropicale (PT-61) dont la richesse en éléments minéraux nutritifs est bien supérieure.

C'est également sur ces deux sols de l'Ouest africain maintenus à une humidité voisine du point de flétrissement qu'on a étudié l'influence, sur la nitrification, du mélange minéral apporté à la dose suivante exprimée en mg pour 100 g de sol :

Mélange minéral SI	3 mg
Carbonate de calcium précipité	500 mg

Il ressort du tableau 8 que l'effet favorable de l'apport du mélange minéral n'est significatif que dans le cas du sol d'argile noire enrichi en caséine. On verra ultérieurement que cette expérience conduite à une telle humidité ne pouvait donner des résultats très nets car elle correspond à la zone hydrique marginale de la nitrification.

L'efficacité de mélange minéral azoté (MN) démontrée par la méthode respirométrique n'a été confirmée qu'en partie par la méthode de numération de la microflore bactérienne totale sur le *sodium albumenate agar* de WAKSMAN (64, 107). Le

tableau 9 révèle, en effet, qu'on n'observe un accroissement nettement significatif de la densité de la microflore que dans le cas de l'enrichissement en amidon dans le sol DIOR qui est le moins bien tamponné.

TABLEAU 8

Influence de l'apport d'un mélange minéral (W2) sur la nitrification dans deux types de sol maintenus au pF 4,2.

Type de sol	Référence	Humidité		Enrichissement	$N\text{-}NO_3$ après 4 semaines d'incubation		
		H %	pF		sans W2	avec W2	A (P = 0,05)
Sol ferrugineux tropical peu lessivé.	DIOR	1,1	4,2	Aucun Caséine (0,127 %)	2,7 5,5	2,7 7,7	2,8 2,8
Argile noire tropicale.	PT-61	9,6	4,2	Aucun Caséine (0,127 %)	13,2 64,2	13,0 75,2	6,3 6,3

Il résulte de ces expériences que l'enrichissement en sels minéraux n'apparaît vraiment indispensable que dans le cas de l'incorporation au sol d'un métabolite dont la dose anormale perturbe l'équilibre ionique qu'il est nécessaire de rétablir.

TABLEAU 9

Influence de l'apport d'un mélange minéral riche en carbonate de calcium sur la prolifération de la microflore bactérienne totale dans un sol ferrugineux tropical peu lessivé et dans un sol d'argile noire tropicale maintenus au pF 4,1.

Type de sol	Durée d'incubation	Témoin	Mélange minéral MN	Amidon	Amidon + mélange minéral MN	A	
						P = 0,05	P = 0,01
Sol ferrugineux tropical peu lessivé DIOR.	1 semaine	6,50	6,70	6,70	7,07	0,28	0,40
	2 semaines	6,73	6,63	6,70	7,40	0,25	0,36
	4 semaines	6,77	6,77	6,70	7,50	0,25	0,34
Argile noire tropicale TH.	1 semaine	7,47	7,30	8,30	8,47	0,29	0,42
	2 semaines	7,60	7,47	8,47	8,60	0,44	0,65
	4 semaines	7,23	7,47	8,20	8,23	0,39	0,57

Les chiffres sont exprimés en logarithme de la densité par gramme de sol sec à l'air. Dans les échantillons non incubés, les densités exprimées en logarithme étaient respectivement de 6,37 et 7,20 pour les sols DIOR et TH.

Bien entendu, la composition du mélange minéral varie suivant le processus envisagé. Si l'on étudie le métabolisme du soufre, le mélange ne contient pas de soufre. Si l'on étudie la dégradation d'un hydrate de carbone, le mélange contient assez d'azote pour que le rapport C/N ait une valeur donnée, etc. Notons enfin que, pour éviter une augmentation de la tension osmotique, l'enrichissement en calcium a toujours été effectué avec le carbonate.

On a ajouté une dose de carbonate de calcium particulièrement élevée dans le cas de l'étude de certains processus, notamment ceux de minéralisation de l'azote (0,5 p. 100), de minéralisation du phosphore et de sulfoxydation (1 p. 100), afin d'éviter une modification trop importante du pH dans les sols mal tamponnés. Cette dose a été beaucoup plus faible, lors de l'étude des processus de dégradation du carbone organique (0,1 p. 100 en général).

Un exemple particulièrement frappant de la nécessité de l'adjonction du carbonate de calcium et de sels minéraux est fourni par l'expérience résumée au tableau 10, d'où il ressort que cette adjonction apparaît, en effet, indispensable à la mise en évidence de la prolifération des microorganismes sulfoxydants.

Les formules d'enrichissement en sels minéraux ont été inspirées des formules utilisées pour la préparation des milieux destinés à la culture des germes appartenant aux différents groupements physiologiques correspondants (97).

TABLEAU 10

Influence de l'apport d'un mélange minéral riche en carbonate de calcium sur la prolifération des germes sulfoxydants dans un sol ferrugineux tropical lessivé (DH) mis à l'incubation au pF 4,3 pendant 6 semaines.

Enrichissement	pH		Densité des germes sulfoxydants après incubation (en logarithme)
	avant incubation	après incubation	
Aucun	6,60	6,57	3,70
Soufre sublimé (0,2 %)	6,53	5,47	3,57
Soufre sublimé (0,2 %) et mélange minéral apportant au sol 1 % de $CaCO_3$	7,23	7,30	4,33
A (P = 0,05)	0,19		0,47
A (P = 0,01)	0,27		0,69

4. — *Influence des principaux types d'enrichissement utilisés sur le pF du sol*

On a vu, au chapitre I par. D, qu'au lieu d'étudier l'influence de l'enrichissement sur le pF du sol, il revenait au même d'étudier cette influence sur le taux d'humidité de ce sol maintenu à un pF constant. C'est en se basant sur cette considération qu'on a vérifié dans quelle mesure les différents types d'enrichissement adoptés dans la présente étude expérimentale étaient susceptibles d'entraîner une modification significative du pF. On a utilisé, pour cette vérification, le sol d'argile noire tropicale TH, qui a été amené et maintenu 7 jours au pF 5,1 dans une étuve hygroscopique équipée d'un brasseur d'air.

Après ce traitement on a observé :

— dans les échantillons non enrichis, un accroissement du taux d'humidité de 2,15 p. 100 (taux d'humidité avant passage à l'étuve hygroscopique : 5,24 p. 100; après passage : 7,39 p. 100).

— dans les échantillons enrichis, un accroissement du taux non significativement différent de celui observé dans les échantillons non enrichis, sauf dans le cas de l'apport de la forte dose de glucose (2 p. 100) utilisée dans l'étude de l'évolution de la stabilité structurale. On verra au chapitre IX que, dans ce dernier cas, un artifice expérimental a permis d'éliminer l'inconvénient résultant de la modification du pF.

On est donc en droit de conclure que, dans les conditions expérimentales où nous nous sommes placé, les tensions d'origine osmotique peuvent être négligées par rapport aux autres forces de rétention.

Conclusion relative à la validité de la technique expérimentale

Les différentes expériences de contrôle que l'on vient de décrire aux paragraphes C et D ci-dessus concourrent à démontrer la validité de la technique expérimentale fondée sur :

— la préparation par humidification directe, suivie de malaxage, des gammes d'échantillons de sol ;

— l'emploi de formules d'enrichissement ne modifiant pas significativement la tension osmotique.

On a pu vérifier d'une part que la technique d'humidification directe donnait des résultats identiques à la technique d'humidification indirecte par mise en équilibre avec une atmosphère à humidité relative connue. Cette concordance est même exceptionnellement bonne pour les sols d'argile noire tropicale dont les seuils de glucolyse, déterminés par l'une et l'autre méthode, ne s'écartent pas des valeurs 5,4-5,5.

On a vérifié d'autre part que la technique par humidification (directe ou indirecte), donnait des résultats très proches de la technique par dessèchement car l'effet d'hystérésis est relativement peu important dans les conditions expérimentales où nous opérons. On a préféré, en général, la première méthode pour des raisons pratiques et, notamment, pour son adaptation aux analyses de série.

E. — Effets de l'augmentation du pF sur les processus biologiques

On va voir que l'augmentation du pF dans le sol a un double effet sur les processus biologiques. Elle entraîne d'abord un allongement de la durée de latence ; elle provoque, en outre, une diminution de l'intensité du métabolisme.

1. — *Influence sur la durée de latence*

Par latence, nous entendons le temps nécessaire à l'accroissement significatif, dans un sol maintenu à un pF donné, du taux des produits métabolisés qu'on recherche

TABLEAU II

Influence de l'humidité sur la longueur de la latence de la cellulolyse, de l'amylolyse et de la minéralisation du carbone organique préexistant dans un sol d'argile noire tropicale (méthode respirométrique).

pF	Durée de la latence en jours		
	Cellulolyse	Amylolyse	Minéralisation du C du sol
5,3	> 21	> 21	4
5,0	> 21	> 21	5
4,6	> 21	6	3
4,3	> 21	2	< 1
3,9	10	< 1	< 1
2,7	4	< 1	< 1

(nitrates, sulfates, par exemple) par rapport au taux d'origine. Il peut s'agir aussi de la densité des microorganismes, ou de l'apparition des colonies microbiennes responsables du phénomène que l'on suit. Si, pour certaines substances à métabolisation

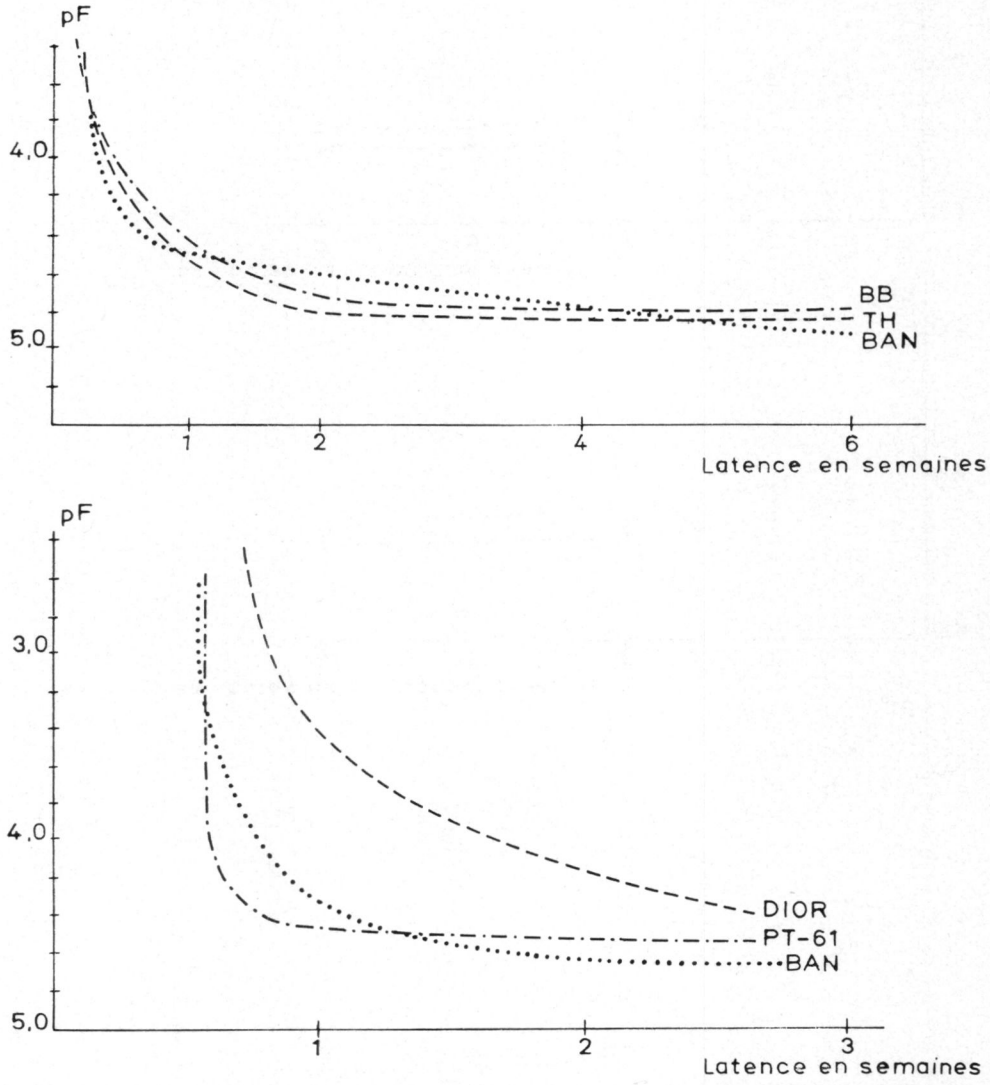


FIG. 2. — *Influence du pF sur la longueur de la latence dans le cas de l'ammonification de la caséine (graphique du haut) et dans le cas de la cellulolyse (graphique du bas). Les courbes d'ammonification sont pratiquement confondues car les exigences écologiques de la microflore ammonifiante sont sensiblement les mêmes dans les trois types de sol étudiés (sols d'argile noire TH et BAN et sol brun subaride BB). Par contre, le décalage net des courbes de cellulolyse montre que les exigences écologiques des germes intervenant dans la cellulolyse varient sensiblement d'un sol à l'autre, l'expérience ayant porté dans ce cas sur les deux sols d'argile noire PT-61 et BAN et sur le sol ferrugineux tropical DIOR.*

rapide (glucose, saccharose, etc.), l'étude de la latence ne présente qu'un intérêt limité, il n'en est pas de même pour les produits à métabolisation plus lente tels que la tyrosine, la caséine, le soufre, la cellulose et même l'amidon (tableau II). La

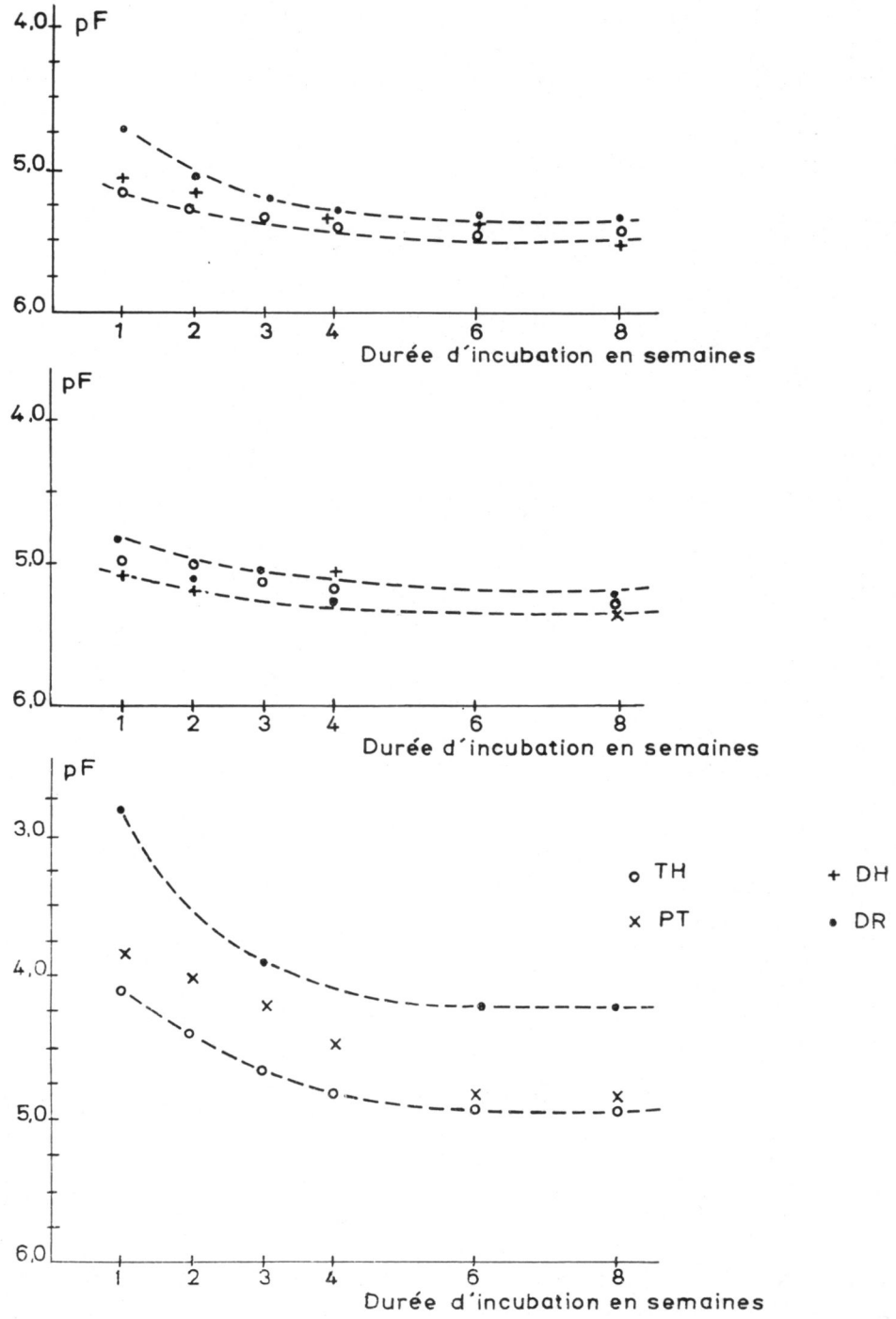


FIG. 3. — *Influence du pF sur le temps d'incubation nécessaire à la disparition* totale *de différentes substances énergétiques incorporées au sol. De haut en bas : glucose, amidon, tyrosine. Sols expérimentés : sols d'argile noire tropicale TH ou PT, sol ferrugineux tropical lessivé DH et sol faiblement ferrallitique DR.*

figure 2, fait ressortir très nettement l'allure hyperbolique de la courbe d'évolution de la durée de latence en fonction du pF. Il en est de même pour la courbe relative à la durée d'incubation nécessaire à la disparition totale de diverses substances énergétiques incorporées au sol : glucose, amidon, tyrosine (figure 3). On verra au paragraphe suivant l'intérêt de ces courbes pour la mise au point des durées d'incubation en vue de la détermination des seuils.

2. — *Influence sur l'intensité du métabolisme*

Pour juger de l'évolution des processus biologiques aux faibles humidités, il vient immédiatement à l'esprit d'utiliser la technique respirométrique. C'est ce que nous avons fait pour l'étude de la glucolyse, de l'amylolyse et de la cellulolyse. Il ressort de la figure 4 que l'augmentation du pF ne se traduit pas seulement par un accroissement de la durée de latence qui n'est, sur cette série de graphiques, net que pour la cellulolyse, parce que, pour les germes correspondants, elle s'exprime en jours et non en heures. Elle provoque aussi un ralentissement des échanges respiratoires se traduisant par un décalage important entre les courbes correspondant aux différents pF.

La minéralisation du glycérophosphate de sodium présente les mêmes caractéristiques, à condition de se placer uniquement aux faibles humidités (pF supérieur à 4,5). Pour le pF 2,7, on obtient une courbe caractérisée par un maximum au 3e jour (figure 5).

F. — Notion de seuil

Par seuil de démarrage ou pF limite, nous désignons le pF maximum pour lequel on observe, dans un sol donné, le démarrage significatif de l'activité biologique d'un groupement de microorganismes, au bout d'un laps de temps suffisant pour atteindre le palier correspondant à la stabilisation du phénomène.

Le seuil de démarrage ainsi déterminé est pratiquement indépendant de la durée d'incubation, si celle-ci est suffisamment longue. En effet, les courbes d'évolution de la durée de latence en fonction du pF (figure 2), dont il vient d'être question au paragraphe E ci-dessus, peuvent également être interprétées comme des courbes de variation du niveau des seuils observés en fonction des durées d'incubation. On remarque, alors, que les seuils sont pratiquement stabilisés, lorsque la durée d'incubation est assez longue. C'est précisément cette durée d'incubation, correspondant au début du palier de stabilisation des pF, qui a été adoptée dans la plupart des protocoles expérimentaux ayant pour objet la mesure des seuils. Toutefois, pour l'étude de certaines fonctions (glucolyse, amylolyse, cellulolyse), on a utilisé, en plus de la durée d'incubation ainsi déterminée (incubation normale) une durée d'incubation plus courte. Dans ce cas, on a observé un décalage entre le niveau des seuils mesurés après l'incubation normale et le niveau des seuils mesurés après l'incubation courte. Ce décalage est fonction, d'une part du type pédologique, d'autre part de la vitesse de dégradation de la substance métabolisable. Il est d'autant plus faible que le sol est biologiquement plus actif (par exemple un sol d'argile noire tropicale) et que la substance est plus rapidement métabolisable (glucose).

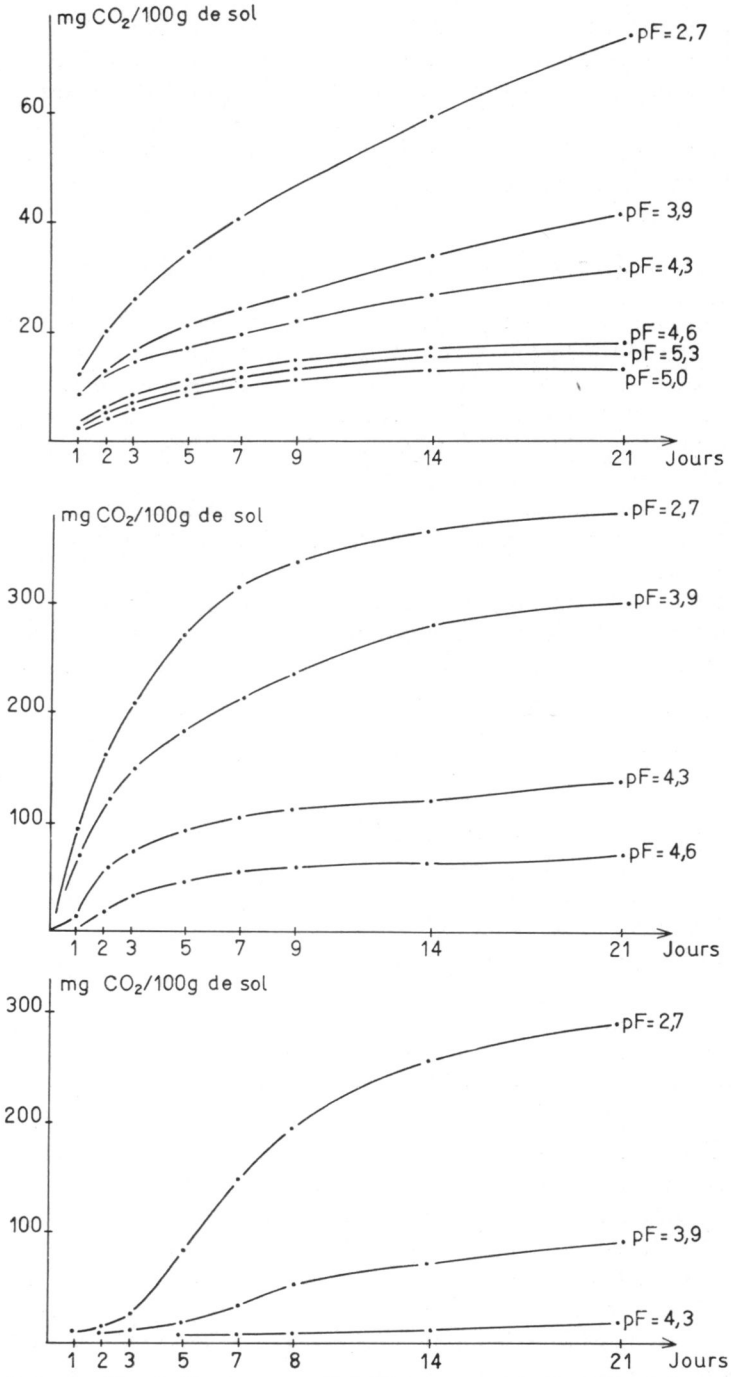


FIG. 4. — *Influence du pF sur le dégagement* cumulé *de CO_2 provenant de la dégradation de la matière organique carbonée préexistant dans le sol (graphique du haut), de la dégradation de l'amidon (graphique du milieu) et de la dégradation de la cellulose (graphique du bas). Les courbes de dégradation de la matière organique préexistant dans le sol ont été faites à une échelle plus grande que les courbes de dégradation de l'amidon et de la cellulose.*

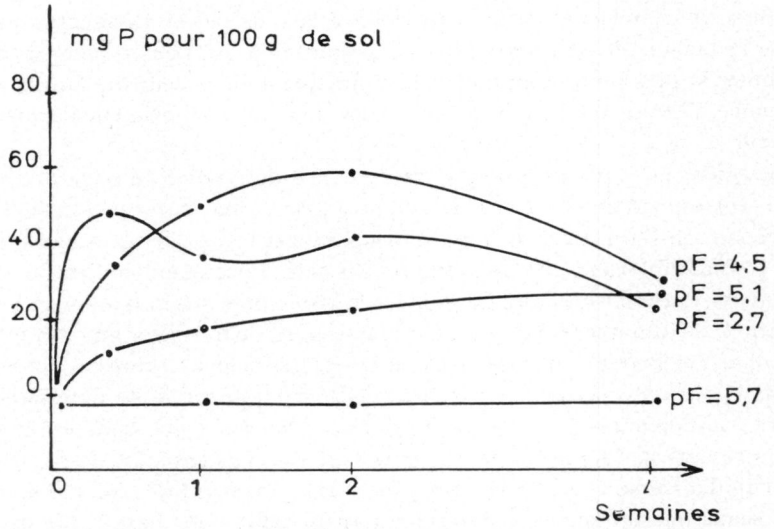


FIG. 5. — *Minéralisation du glycérophosphate de sodium en fonction du temps dans un sol d'argile noire tropicale (BAN) maintenu à différents pF.*

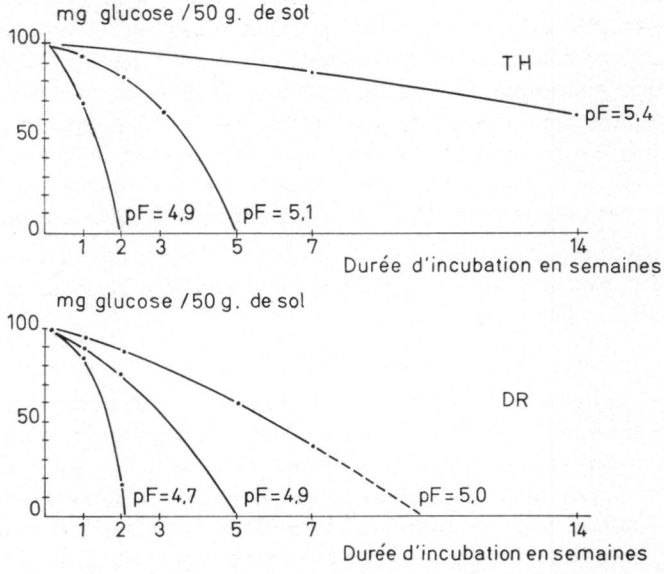


FIG. 6. — *Disparition du glucose en fonction du temps d'incubation dans 2 sols maintenus à des pF supérieurs à 4,2. De haut en bas : sol d'argile noire tropicale TH et sol faiblement ferrallitique DR.*

Le démarrage de l'activité biologique au niveau du seuil correspond à la plus petite augmentation significative dans le sol :

— soit de la densité des microorganismes appartenant au groupement étudié ;

— soit de la teneur du sol en substances résultant de l'activité de la microflore : azote ammoniacal, azote nitrique, sulfates, sulfures, phosphates ;

— soit du dégagement de CO_2 résultant de la dégradation du carbone organique.

Au lieu de chercher à mettre en évidence la plus petite augmentation significative de la teneur du sol en produits de dégradation, on peut également chercher à déterminer la plus petite diminution significative de la teneur du sol en une substance donnée. C'est ce qui a été fait pour l'étude de l'immobilisation de l'azote minéral dans le sol.

Parallèlement au seuil ainsi défini, on a parfois déterminé un *seuil de disparition* ou seuil correspondant à la disparition *complète* d'une substance métabolisable incorporée au sol. Dans ce cas, la durée d'incubation et la dose de substance incorporée influent considérablement sur les résultats du test. Pour éliminer l'erreur due à ces deux facteurs, il a été nécessaire de prendre la triple précaution d'allonger les durées d'incubation, de diminuer les doses d'enrichissement, de n'utiliser que des substances à métabolisation rapide : glucose, amidon et accessoirement tyrosine.

Dans la plupart des cas, c'est le seuil de démarrage qui a été déterminé et l'on emploiera indifféremment l'expression *seuil de démarrage* ou *seuil*, étant entendu que, dans ce dernier cas, le terme de démarrage est sous-entendu. Par contre, pour les seuils du deuxième type, on précisera toujours qu'il s'agit de *seuils de disparition*.

Les seuils ont toujours été déterminés en prenant pour base l'état du sol non humidifié, c'est-à-dire sec à l'air du laboratoire dont le degré hygrométrique a toujours été voisin de 72 p. 100, ce qui correspond à un pF de 5,7 environ. Dans chaque série expérimentale, c'est donc à la valeur de base x_0 caractérisant le niveau de l'activité biologique (par exemple la densité bactérienne ou la teneur de la substance étudiée) dans les échantillons non humidifiés (témoins), qu'on a comparé les valeurs x caractérisant l'activité biologique dans les échantillons de plus en plus humides ou, en d'autres termes, amenés à des pF de plus en plus faibles. Il s'agit, du point de vue statistique, d'une comparaison de plusieurs traitements avec un témoin, comparaison pour l'analyse de laquelle on a adopté la méthode de DUNNETT (46). Les tables de t établies par cet auteur permettent le calcul, à partir de l'écart-type s de l'expérience, de la tolérance (allowance) $A = ts\sqrt{2/N}$, où N représente le nombre de répétitions. Par définition, le seuil est atteint pour une valeur x_s de la caractéristique biologique étudiée telle que :

$$x_s = x_0 + A$$

Le pF correspondant pF_s, qui n'est autre que le seuil ou pF limite défini ci-dessus, est calculé par interpolation entre les deux valeurs connues qui l'encadrent, ce qui suppose que la relation entre le pF et la caractéristique biologique x est de nature linéaire dans cet intervalle. Une telle approximation est admissible car les points servant à la construction des courbes sont suffisamment rapprochés. Soient pF_1 et pF_2 les pF encadrant le pF cherché et correspondant aux deux valeurs x_1 et x_2 de la caractéristique considérée, le seuil est alors donné par la formule :

$$pF_s = pF_1 - \frac{(pF_1 - pF_2)(x_0 + A - x_1)}{x_2 - x_1}.$$

Pour le calcul des seuils, on a toujours utilisé la table de t de DUNNETT correspondant à une probabilité $P = 0{,}05$.

Les résultats des expériences autres que celles qui avaient pour but la détermination des seuils ont été analysés en utilisant le même test, soit pour $P = 0{,}01$, soit pour $P = 0{,}05$, soit dans les deux cas à la fois.

En ce qui concerne les numérations microbiennes, soulignons dès maintenant qu'elles permettent la définition d'*un seuil de prolifération* plutôt que celle d'un *seuil d'activité physiologique*. Notons enfin que les calculs statistiques relatifs aux numérations bactériennes ont toujours été effectués, non à partir des chiffres de densité de germes ou de microcolonies, mais à partir de leur logarithme.

Les *principaux seuils de démarrage* déterminés ici ont été les suivants :

a) Seuils de minéralisation de l'azote :
- — ammonification ;
- — nitrification ;

b) Seuils de minéralisation du carbone.
c) Seuils de métabolisation du soufre.
- — sulfoxydation ;
- — sulfhydrisation ;

d) Seuils de minéralisation du glycérophosphate.
e) Seuils d'immobilisation de l'azote minéral global ($N\text{-}NH_3 + N\text{-}NO_3$).
f) Seuils de régénération de la stabilité structurale.
g) Seuils de prolifération des microorganismes :
- — *Azotobacter chroococcum* ;
- — microflore nitrifiante ;
- — microflore cellullolytique ;
- — microflore sulfoxydante ;
- — microflore carboxyméthylcellullolytique ;
- — microflore bactérienne totale (Waksman) ;
- — microflore fongique totale (Martin).

Les *seuils de disparition* déterminés ici ont été les suivants :
a) Seuils de disparition de la tyrosine ;
b) Seuils de disparition du glucose ;
c) Seuils de disparition de l'amidon.

G. — Conditions d'incubation

On a souligné, à l'occasion de la définition du seuil, l'importance de la durée d'incubation.

En ce qui concerne la température, celle-ci a été fixée uniformément à $30 \pm 1°C$.

Il est très important de maintenir constante la température de l'étuve d'incubation et surtout d'éviter les sautes brusques de température qui provoquent des condensations à l'intérieur des fioles hermétiquement fermées. En pratique, ces condensations sont inexistantes pour les humidités inférieures au point de flétrissement. Mais, pour les humidités plus fortes, il est indispensable de prendre la précaution de calorifuger les fioles ou de les maintenir dans un bain d'eau où la température est beaucoup plus stable qu'à l'air.

Pour éviter une modification importante de la composition de l'atmosphère susceptible de nuire au déroulement des processus étudiés, les échantillons de sol ont été placés dans des flacons d'une dimension suffisante pour que le rapport volume du flacon/volume du sol soit au minimum de 12,5. D'autre part, sauf dans le cas où

la durée d'incubation n'a été que d'une semaine ou lorsque ce rapport a été supérieur à 25, on a aéré deux fois par semaine les échantillons en enlevant les bouchons pendant quelques minutes. Cette opération n'a pas modifié sensiblement l'humidité du sol.

H. — Précision des méthodes d'investigation

Les séries de protocoles expérimentaux qui seront décrits ultérieurement ont été réalisés à partir d'une quinzaine d'échantillons de sol. En raison du grand nombre de ces protocoles, du nombre de répétitions (au minimum 4) et du poids élevé de sol utilisé pour chaque unité expérimentale (40 à 100 g), ces échantillons avaient au départ un poids de l'ordre de la centaine de kilogrammes. Avant toute analyse, il a donc été nécessaire de procéder à une homogénéisation très soigneuse. Celle-ci n'a toutefois pas été suffisante pour éliminer une certaine hétérogénéité qui, bien que faible, a contribué à augmenter sensiblement l'erreur expérimentale. Cette hétérogénéité rémanente constitue donc une première cause d'erreur que l'on peut qualifier d'intrinsèque.

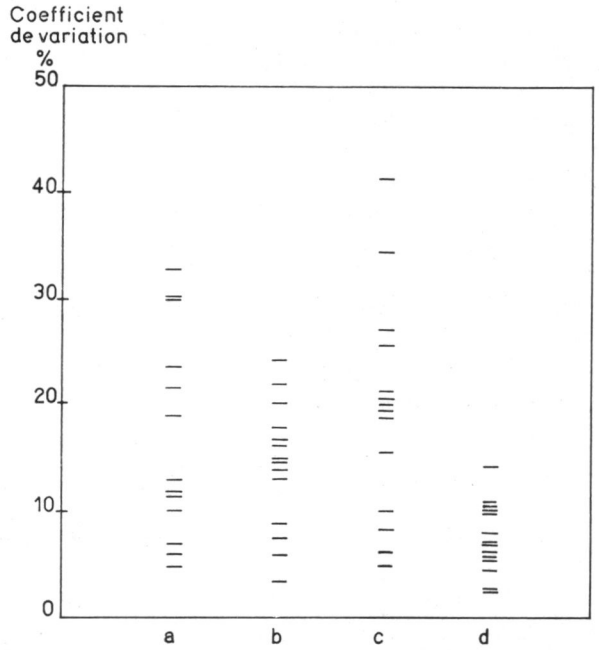


Fig. 7. — *Précision des techniques expérimentales exprimée en fonction du coefficient de variation, dans le cas de la minéralisation de l'azote organique préexistant* (a) *ou ajouté* (b), *dans le cas de la minéralisation du carbone organique préexistant* (c) *et dans le cas de la minéralisation du phosphore organique ajouté* (d).

Mais il est une autre source d'erreur, celle-là d'origine extrinsèque, qui est due au fait que l'humidité du sol sec à l'air a quelque peu varié autour du pF 5,7 (moyenne annuelle), malgré les précautions prises pour travailler dans des locaux où le degré hygrométrique étant aussi constant que possible. Pour les sols argileux, tels que les sols PT et TH, l'erreur est faible puisque les coefficients de variation ne sont que de 4,7 p. 100 et 5,0 p. 100. Mais, pour les sols très pauvres en argile, ces coefficients sont beaucoup plus élevés (20,4 p. 100 pour le sol DR).

L'erreur expérimentale globale résulte, non seulement de l'hétérogénéité initiale des échantillons de sol et des légères variations de l'humidité de base, mais aussi des erreurs analytiques (sensiblement plus élevées pour les numérations que pour les dosages chimiques) et enfin des variations qui sont toujours liées aux phénomènes de nature biologique.

Pour donner une idée de la précision globale des méthodes utilisées, on a calculé les coefficients de variation de 54 séries expérimentales appartenant à 4 types de protocoles destinés à déterminer les seuils de démarrage dans les cas suivants :

a) minéralisation de l'azote organique préexistant dans le sol (échantillons non enrichis) ;

b) minéralisation de différentes substances organiques incorporées au sol (caséine, tyrosine, feuilles broyées) ;

c) dégagement potentiel de CO_2 d'échantillons de sol non enrichis ;

d) minéralisation du glycérophosphate de sodium.

Les résultats ont été portés sur la figure 7 qui montre que les coefficients de variation diffèrent d'un sol à l'autre mais restent en général inférieurs à 30 p. 100. Les expériences effectuées à partir de sols enrichis (*b* et *d*) ont été plus précises que celles qui ont été effectuées avec des sols non enrichis (*a* et *c*), la précision la meilleure ayant été obtenue dans le cas de la minéralisation du glycérophosphate, pour lequel le coefficient de variation est toujours inférieur à 15 p. 100.

Lors des calculs, les valeurs des pF ont été déterminées avec deux décimales mais, comme on ne considère en fait comme valable que la première décimale, tous les chiffres de pF ont été arrondis.

I. — Caractéristiques pédogénétiques, physiques et biologiques des sols étudiés

1. — *Situation climatique des sols étudiés*

Les sols étudiés ici sont situés d'une part dans la zone semi-aride, d'autre part dans la zone tropicale sèche et exceptionnellement dans la zone tropicale semi-humide (fig. 8). Les échantillons correspondants ont été prélevés dans les zones soumises aux six régimes climatiques suivants, définis par l'indice des saisons pluviométriques d'Aubreville (4, 5). Cet indice est constitué par un groupe de trois chiffres définissant le régime pluviométrique d'un climat. Le premier chiffre correspond au nombre des mois très pluvieux (précipitation mensuelle supérieure à 100 mm), le deuxième chiffre correspond au nombre des mois intermédiaires, le troisième chiffre correspond au nombre des mois écologiquement secs (précipitation mensuelle inférieure à 30 mm).

a) *Climat guinéen maritime* (Gm). — Caractérisé par un indice des saisons pluviométriques du type 5-2-5 et par une pluviométrie totale élevée (3 000 à 5 000 mm).

b) *Climat sahélo-soudanais* (SO). — Caractérisé par un indice des saisons pluviométriques du type 4-2-6 et une pluviométrie allant de 400 à 1 200 mm ,mais presque toujours inférieure à 1 000 mm.

c) *Climat sahélo-sénégalais* (Se). — Caractérisé par un indice des saisons pluviométriques du type 3-2-7 et une pluviométrie faible (500 à 900 mm).

d) *Climat guinéen de Basse-Casamance* (Gc). — Caractérisé par un indice des saisons pluviométriques du type 5-0-7 et une pluviométrie moyenne à élevée (1 200 à 1 750 mm).

e) *Climat sahélo-côte sénégalaise* (Ss). — Localisé à une étroite bande côtière le long du littoral sénégalais, caractérisé par un indice des saisons pluviométriques du type 2-2-8 et une pluviométrie très faible (400 à 500 mm).

f) *Climat sahélo-saharien* (SSa). — Caractérisé par un indice des saisons pluviométriques du type 1-2-9 et une pluviométrie très faible (200 à 400 mm).

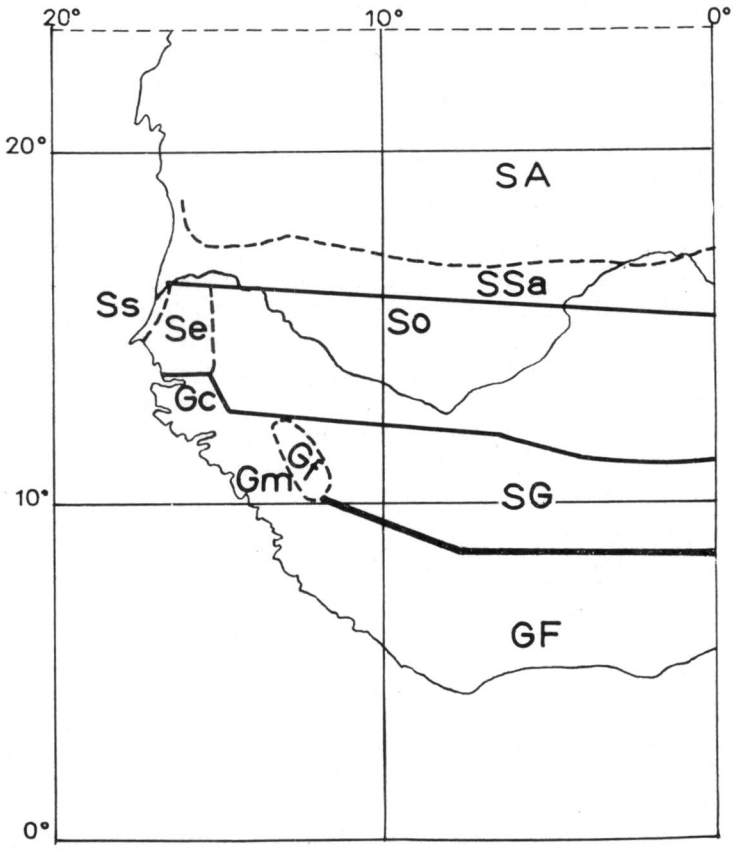


FIG. 8. — *Carte de bioclimats de l'Afrique Occidentale, selon* AUBREVILLE (4) :
1° Climats tropicaux humides. — type : climat guinéen-forestier GF.
2° Climats tropicaux semi-humides. — type : climat soudano-guinéen SG ; variante citée ici : climat guinéen maritime Gm.
3° Climats tropicaux secs. — type : climat sahélo-soudanais SO ; variantes citées ici : climat sahélo-sénégalais Se, climat guinéen Basse-Casamance Gc, climat sahélo-côte sénégalaise Ss.
4° Climats subdésertiques. — type : climat sahélo-saharien SSa.
5° Climats désertiques. — type : climat saharien SA.

On peut admettre que les deux derniers types climatiques appartiennent à la zone semi-aride.

2. — *Place des sols étudiés dans la classification* AUBERT-DUCHAUFOUR

De l'exposé de ces caractéristiques climatiques et du tableau 12, on déduit que les sols étudiés correspondent à des zones présentant toujours une saison sèche très marquée. Ils sont donc soumis à des alternances de phases très contrastées d'aérobiose

et d'anaérobiose, liées à la teneur en eau du sol, dont l'importance pédogénétique a été soulignée par de nombreux auteurs dont SAMTSEVITCH (105), IARKOV (62), DUCHAUFOUR (45).

On sait que la classification des sols africains d'AUBERT et DUCHAUFOUR (2), sur laquelle nous nous appuyons et qui est essentiellement une classification génétique basée sur les processus d'évolution, comporte les neuf classes suivantes :

I. — Sols minéraux bruts
II. — Rankers et sols peu évolués
III. — Sols calcimorphes
IV. — Sols steppiques-isohumiques
V. — Sols à humus doux = sols à mull
VI. — Sols à humus bruts = sols à mor
VII. — Sols à hydroxydes et humus bien décomposé
VIII. — Sols salés = sols halomorphes
IX. — Sols hydromorphes

Nos travaux, qui ont porté sur des sols appartenant à trois de ces neuf classes, correspondent aux types pédologiques les plus importants sur le plan agronomique que l'on peut rencontrer dans l'Ouest africain :

a) La classe IV ou classe des sols steppiques isohumiques est représentée ici par un sol brun subaride (BB) et un sol brun-rouge subaride (BR) provenant de la zone sahélo-saharienne.

b) La classe VII ou classe des sols à hydroxydes et humus bien décomposé est représentée par :

— *des sols ferrugineux tropicaux non ou peu lessivés* (TV et DIOR) provenant de la zone sahélo-sénégalaise.

— *des sols ferrugineux tropicaux lessivés* provenant de la zone sahélo-sénégalaise (DH) et sahélo-soudanaise (SOR-10) ;

— *des sols ferrallitiques* à trois degrés d'évolution :

— sol faiblement ferrallitique peu typique provenant de la zone sahélo-séné galaise (DR) ;

— sol faiblement ferrallitique provenant de la zone sahélo-soudanaise (SF) ;

— sol ferrallitique typique provenant de la zone guinéenne-maritime (KA).

c) La classe IX ou classe des sols hydromorphes *sensu lato* est bien représentée par :

— *des sols d'argile tropicale*, acides ou faiblement acides, provenant de la zone sahélo-côte sénégalaise (TH, PT, PT-61, AN, RZ) ou sahélo-sénégalaise (BAN, BAN-S).

— des sols à hydromorphie quasi-permanente sur une grande partie du profil, sauf en surface, provenant de la zone sahélo-soudanaise (SOR-130) ou guinéenne maritime (KB) ; on les désignera simplement ici sous le vocable de *sols hydromorphes typiques*.

Dans un but de simplification, le sol RZ a été classé avec les argiles noires tropicales. Il s'agit en fait, d'après MAIGNIEN, d'une rendzine grise d'érosion sur marnes tendant vers les argiles noires (80). On a rangé dans le même groupe les sols BAN et BAN-S que BONFILS et FAURE préfèrent inclure dans un sous-groupe spécial (17). Il ne s'agit, en effet, peut-être pas d'argiles noires typiques mais les caractéristiques physiques, chimiques, et biologiques de ces sols en sont si proches que nous ne voyons pas la nécessité de les traiter séparément.

Le tableau 12 permet le repérage de chacun des lieux de prélèvement. Lorsqu'il a été nécessaire de revenir au même point pour récolter un nouvel échantillon, celui-ci porte à la suite de son indicatif primitif un chiffre ou une lettre supplémentaire. Exemple : PT et PT-61 ont été récoltés au même endroit mais à deux dates différentes ; il en est de même pour BAN et BAN-S.

TABLEAU 12

Données géographiques et climatiques concernant les différents types de sol étudiés.

Type de sol	Référence	Localité la plus proche	Coordonnées géographiques		Nombre de mois écologiquement secs
Sol brun subaride.	BB	Kankossa, Mauritanie	15°55'N	11°45'O	8
	BR	Kankossa, Mauritanie	15°50'N	11°40'O	8
Sol ferrugineux tropical non ou peu lessivé	TV	Tivaouane, Sénégal	14°57'N	16°50'O	7
	DIOR	Bambey, Sénégal	14°43'N	16°29'O	7
Sol ferrugineux tropical lessivé	DH	Darou, Sénégal	13°55'N	15°49'O	7
	SOR-10	Sotuba, Soudan	12°40'N	7°55'O	6
Sol ferrallitique	DR	Darou, Sénégal	13°55'N	15°49'O	7
	sans réf.	Bayottes, Sénégal	12°29'N	16°17'O	7
	sans réf.	Bignona, Sénégal	12°49'N	16°14'O	7
	SF	Séfa, Sénégal	12°42'N	15°33'O	7
	KA	Kindia, Guinée	9°57'N	12°56'O	5
Sol d'argile noire	TH	Thiès, Sénégal	14°47'N	17° 0'O	7
	PT	Pout, Sénégal	14°46'N	17° 4'O	7
	BAN	Bambey, Sénégal	14°43'N	16°29'O	7
	AN	Rufisque, Sénégal	14°43'N	17°17'O	7
	RZ	Bargny, Sénégal	14°42'N	17°13'O	7
Sol hydromorphe typique	KB	Kindia, Guinée	9°57'N	12°56'O	5
	SOR-130	Sotuba, Soudan	12°40'N	7°55'O	6

Pour une description plus détaillée de ces types pédologiques, on se reportera aux travaux récents de MAIGNIEN (78-79), BONFILS et FAURE (17), CHARREAU (24).

3. — *Caractéristiques physiques des sols étudiés*

Par leurs caractéristiques physiques (tableaux 13 et 14, figure 9), les sols étudiés ici peuvent se classer en :

a) *Sols à forte rétention hydrique.* Ce sont les sols les plus argileux, caractérisés par une humidité au point de flétrissement supérieure à 8 p. 100. Appartiennent à ce groupe :

— un sol ferrallitique (KA) ;

— tous les sols d'argile noire tropicale ;

— un des deux sols hydromorphes typiques (KB).

b) *Sols à rétention hydrique moyenne* dont l'humidité au point de flétrissement est comprise entre 4 p. 100 et 8 p. 100. Se trouvent dans ce groupe :

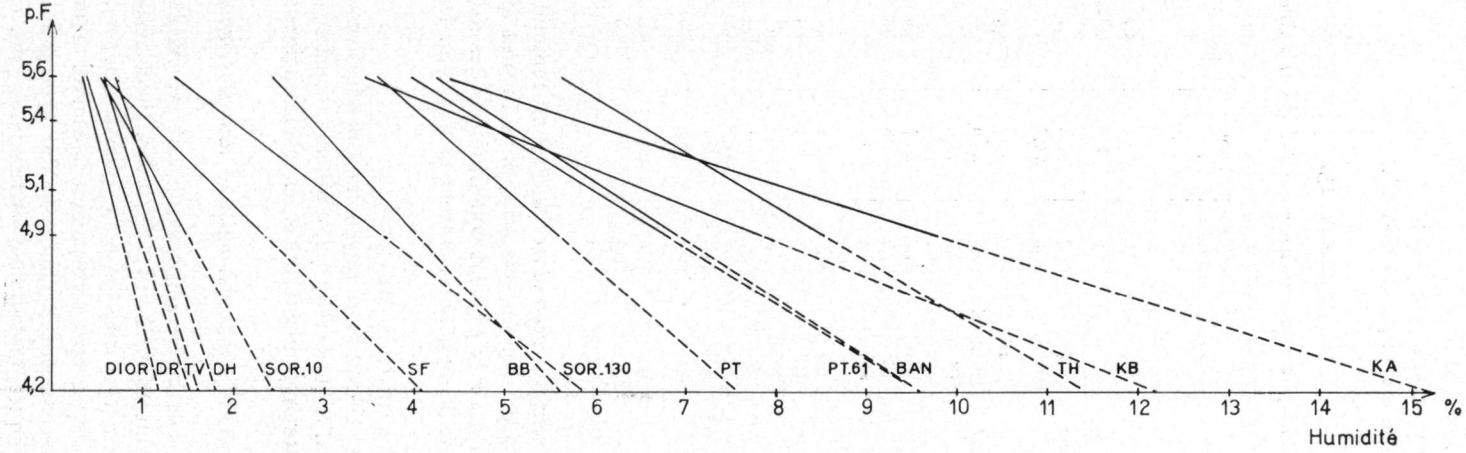


FIG. 9. — *Variation du pF en fonction de l'humidité dans les différents types de sol étudiés.*

— un sol brun typique (BB) ;
— un sol faiblement ferrallitique (SF) ;
— un sol hydromorphe typique (SOR-130).

TABLEAU 13

Caractéristiques granulométriques et pH des sols étudiés.

Type de sol	Référence	Sables grossiers %	Sables fins %	Limon %	Argile %	pH
Sol brun subaride	BB	3,5	72,4	8,7	14,5	7,9
	BR	19,5	76,3	1,3	1,6	6,9
Sol ferrugineux tropical non ou peu lessivé	TV	36,0	57,5	2,7	4,0	6,6
	DIOR	22,5	74,0	0	3,5	5,2
Sol ferrugineux tropical lessivé	DH	19,4	65,1	7,5	8,2	6,5
	DH-61	20,8	65,0	5,5	6,0	6,1
	SOR-10	9,5	76,6	8,7	6,5	5,7
Sol ferrallitique	DR	34,3	59,7	3,0	3,5	5,9
	SF	32,9	51,9	4,0	10,5	5,0
	KA	20,8	19,2	12,5	32,0	4,0
Sol d'argile noire tropicale	TH	15,9	47,8	7,8	23,8	7,3
	PT	12,6	58,1	9,0	18,8	6,4
	PT-61	13,2	57,4	6,3	23,1	6,5
	BAN	14,2	53,1	3,2	29,5	7,5
	BAN-S	15,7	47,0	5,0	24,0	7,4
	AN	14,3	40,1	7,2	26,5	7,8
	RZ	22,4	28,6	5,0	27,0	7,7
Sol hydromorphe typique	KB	34,6	20,1	26,8	12,3	5,6
	SOR-130	16,2	55,1	12,5	15,5	5,5

c) *Sols à rétention hydrique faible et très faible* dont l'humidité au point de flétrissement est inférieure à 4 p. 100. Ces sols sont, dans l'Ouest africain, très fréquents car le matériau originel est très souvent constitué par des sables, et l'humidité au point de flétrissement oscille en général entre 1 et 2 p. 100. Dans cette catégorie se placent :

— un sol brun-rouge subaride (BR) ;
— tous les sols ferrugineux tropicaux non ou peu lessivés et lessivés ;
— un des sols ferrallitiques (DR) qui, d'ailleurs, constitue un terme de passage entre les sols ferrallitiques proprement dits et les sols ferrugineux typiques.

4. — *Caractéristiques biologiques des sols étudiés*

A l'exception des sols hydromorphes qui ont été récoltés humides, tous les échantillons utilisés ici ont été prélevés à l'état sec. Ils correspondent, dans tous les cas, à l'horizon supérieur (0-10 cm) qui est le plus actif au point de vue biologique. Il s'est toujours agi de sols en repos sous jachère âgée d'au moins deux ans. Ainsi que nous l'avons souligné récemment, à chaque grand type pédologique correspond un ensemble de caractéristiques biologiques particulières (36). On aura l'occasion de

TABLEAU 14

Caractéristiques hydriques des sols étudiés.

Type de sol	Référence	Fonction pF = $aH + b$ applicable aux faibles humidités	Humidité au pF = 4,2			Humidité équivalente (centrifugeuse)
			Hygroscopicité (extrapolation)	Point flétrissement du Tournesol	Presse à membrane	
Sol brun subaride	BB	pF = — 0,44 H + 6,67	5,6	5,5	5,6	13,3
	BR	pF = — 1,68 H + 6,27	1,2	1,2	1,1	3,2
Sol ferrugineux tropical non ou peu lessivé	TV	pF = — 1,42 H + 6,42	1,6	1,7	1,5	4,0
	DIOR	pF = — 1,83 H + 6,27	1,1	1,2	1,2	3,3
Sol ferrugineux tropical lessivé	DH	pF = — 1,27 H + 6,50	1,8	1,9	2,0	6,9
	DH-59	pF = — 0,66 H + 6,23	3,1	3,3	3,5	9,4
	DH-61	pF = — 0,71 H + 6,00	2,5	2,4	3,0	8,1
	SOR-10	pF = — 0,72 H + 5,96	2,4	2,7	2,8	9,0
Sol ferrallitique	DR	pF = — 1,17 H + 6,11	1,5	1,5	1,8	3,7
	SF	pF = — 0,40 H + 5,82	4,1	4,3	4,2	8,5
	KA	pF = — 0,13 H + 6,17	15,2	15,9	15,0	24,1
Sol d'argile noire tropicale	TH	pF = — 0,24 H + 6,95	11,5	12,1	12,2	21,7
	PT	pF = — 0,35 H + 6,87	7,6	7,8	8,1	17,0
	PT-61	pF = — 0,25 H + 6,59	9,6	9,6	10,2	17,5
	BAN	pF = — 0,26 H + 6,71	9,6	9,5	9,9	16,8
	BAN-S	pF = — 0,33 H + 6,77	8,0	8,8	8,5	16,4
	AN	pF = — 0,21 H + 6,90	12,9	12,6	12,9	24,6
	RZ	pF = — 0,26 H + 6,91	10,3	10,7	10,0	19,4
Sol hydromorphe typique	KB	pF = — 0,16 H + 6,15	12,2	11,7	12,1	18,5
	SOR-130	pF = — 0,31 H + 6,03	5,9	5,6	—	14,3

TABLEAU 15

Caractéristiques biologiques des sols étudiés.

Type de sol	Référence	*Azotobacter chroococcum*	Germes nitreux		Dégagem. potentiel de CO_2	C ‰	$\frac{C\text{-}CO_2 \times 100}{C}$	N minéral + N minéralisable		N ‰	Coefficient de minéralisation de l'azote
			silicogel	milieu liquide				$N\text{-}NH_3 + N\text{-}NO_3$	$N\text{-}NO_3$		
Sol brun subaride	BB	10	10	250	33	5,2	1,7	12	12	0,49	2,4
	BR	0	80	100	15	2,3	1,8	12	12	0,22	5,5
Sol ferrugineux tropical non ou peu lessivé	TV	0	1 140	1 280	16	2,3	1,9	20	20	0,20	10,0
	DIOR	0	40	130	13	2,0	1,8	7	6	0,25	2,8
Sol ferrugineux tropical lessivé	DH	0	950	440	54	4,5	3,3	15	15	0,46	3,3
	SOR-10	0	250	900	43	4,0	2,9	28	28	0,52	5,4
Sol ferrallitique	DR	0	290	420	14	3,4	1,1	13	13	0,26	5,0
	SF	0	270	310	48	7,3	1,8	38	34	0,63	6,0
	KA	0	180	80	79	30,7	0,7	109	53	2,32	4,7
Sol d'argile noire tropicale	TH	180	2 770	4 570	85	18,3	0,3	40	40	1,89	2,1
	PT	110	2 120	3 770	56	7,1	2,1	33	33	0,66	—
	PT-61	230	5 700	2 000	—	13,4	—	22	21	0,83	2,6
	BAN	1 300	1 900	3 600	59	7,2	2,2	11	11	1,95	0,6
	AN	1 100	—	—	—	8,8	—	—	—	0,80	—
Sol hydromorphe typique	KB	0	240	70	74	19,9	1,0	47	45	1,25	3,7
	SOR-130	0	180	320	81	11,9	1,9	42	14	1,13	3,7

Les densités de germes sont exprimées en unités ou microcolonies par gramme de sol sec à l'air. Le dégagement potentiel de CO_2 l'est en mg/100 g de sol/7 jours et l'azote minéral en p.p.m.

revenir sur cette idée ; mais il semble intéressant de vérifier rapidement dès maintenant la possibilité de différenciation des types pédologiques, en se basant sur quelques critères simples, tels que le dégagement potentiel d'anhydride carbonique, la densité de la microflore nitrifiante ou la présence d'*Azotobacter chroococcum*.

a) *Dégagement potentiel de CO_2 à l'humidité équivalente.*

Bien que le dégagement potentiel de CO_2 — ou respiration endogène de BERNIER (12) — d'un sol, non enrichi, réhumidifié au laboratoire, varie dans un intervalle assez considérable sous l'influence de facteurs extrinsèques, tels que l'époque de récolte ou la durée d'insolation ou de dessèchement, il n'en constitue pas moins un critère intéressant pour la caractérisation rapide des sols sur le plan biologique. C'est ainsi que, parmi les sols étudiés, nous distinguons :

— *Les sols à dégagement potentiel de CO_2 moyen et élevé* (supérieur à 40 mg CO_2/100 g de sol/7 jours). Ce sont toutes les argiles noires tropicales, les sols hydromorphes typiques, les sols ferrallitiques les plus caractérisés et les sols ferrugineux tropicaux lessivés.

— *Les sols à dégagement potentiel de CO_2 faible* (inférieur à 40 mg de CO_2/100 g de sol/7 jours). Ce sont les sols bruns subarides, les sols ferrugineux tropicaux peu ou pas lessivés et le sol ferrallitique peu typique DR.

b) *Densité de la microflore nitrifiante.*

La numération des germes nitreux, aussi bien sur le milieu liquide que sur milieu solide, permet de distinguer :

— *Les sols à forte densité de microcolonies de germes nitreux* (densité supérieure à 1 000 microcolonies par gramme de sol sec à l'air). Il s'agit essentiellement des argiles noires tropicales et accessoirement du sol ferrugineux tropical non lessivé TV, ce qui constitue une exception pour ce dernier type pédologique, exception explicable par le fait qu'il s'agit d'un sol relativement riche en phosphore et calcium. L'analyse chimique et l'analyse biochimique confirment cette caractéristique, car elle prouve que l'azote minéral et l'azote minéralisable s'y trouvent presque exclusivement sous forme nitrique.

— *Les sols de densité moyenne* à faible (densité comprise entre 100 et 1 000 microcolonies par gramme de sol sec à l'air). Ce sont les sols ferrugineux tropicaux lessivés, les sols ferrallitiques et les sols hydromorphes typiques.

— *Les sols à densité très faible* (densité inférieure à 100 microcolonies par gramme de sol sec à l'air). Il s'agit des sols subarides et du sol ferrugineux tropical non ou peu lessivé DIOR.

c) *Densité des* Azotobacter chroococcum.

La présence de ces Bactéries caractérise de façon remarquable les sols d'argile noire tropicale (tableau 15).

CHAPITRE II

FIXATION DE L'AZOTE ATMOSPHÉRIQUE PAR L'AZOTOBACTER CHROOCOCCUM

I. — *Technique expérimentale*

On sait qu'un accroissement important du rapport C/N du sol, par incorporation d'une substance hydrocarbonée, favorise la multiplication des *Azotobacter*. On sait aussi que ce germe a des exigences marquées en phosphore et calcium. Mais la dose optimum de saccharose à utiliser pour l'enrichissement varie suivant les auteurs. Aussi a-t-on cherché à préciser cette dose en effectuant des enrichissements en saccharose allant de 0 à 0,4 p. 100. Une première expérience préliminaire a montré que la dose de 0,2 p. 100 pouvait suffire. On a toutefois adopté la dose de 0,4 p. 100 de façon à augmenter la probabilité de contact entre le saccharose et les cellules d'*Azotobacter* préexistant dans le sol. L'enrichissement exprimé en mg pour 100 g de sol a été effectué sur les bases suivantes :

Saccharose	400 mg
Carbonate de calcium précipité	1 666 mg
Phosphate bipotassique	333 mg

Une deuxième expérience préliminaire a montré que la durée d'incubation minimum au pF 3,0 ainsi qu'au pF 3,6, était de deux jours. Mais comme on n'a constaté aucune diminution après deux jours, on a adopté arbitrairement une durée d'incubation de 7 jours.

Pour déterminer les seuils de prolifération des *Azotobacter chroococcum*, on a préparé une gamme d'échantillons de sol à des pF décroissant de 5,7 environ (sol sec à l'air) à 3,6 environ. Ces échantillons, une fois enrichis avec le mélange à base de saccharose décrit ci-dessus, ont été mis à l'incubation pendant 7 jours. Ils ont été ensuite séchés rapidement. Les numérations de microcolonies d'*Azotobacter chroococcum* ont été effectuées, sur les échantillons ainsi traités, par la technique du saupoudrage sur silico-gel (33). Cette façon de procéder exige le dessèchement préalable du sol ; mais ce traitement ne présente pas d'inconvénient pour la mise en évidence de la prolifération des *Azotobacter*, vraisemblablement parce que ces germes présentent des formes résistant efficacement à la sécheresse.

2. — *Résultats*

Parmi les sols de l'Ouest africain, seuls renferment spontanément des *Azotobacter chroococcum* en quantité notable, certains sols non évolués, comme les sols dunaires, ou des sols évolués, tels que les sols d'argile noire tropicale. C'est à des sols de ce dernier type que nous nous sommes adressé pour déterminer le seuil de multiplication de l'*Azotobacter*.

Il ressort du tableau 16 que ce seuil est compris entre les pF 3,6 et 4,4 ou, si l'on s'exprime en tension, entre 4 et 25 atmosphères.

TABLEAU 16

Seuils de prolifération de l'Azotobacter chroococcum *dans des argiles noires tropicales.*

Référence	Densité des microcolonies d'*Azotobacter chroococcum*			Seuils	
	à l'origine	au seuil	au pF 2,7	pF	Tension en atmosphères
TH	180	460	1 800	3,8	6
PT	110	260	—	3,6	4
BAN-61	440	4 000	16 900	3,9	8
AN	320	890	30 900	4,4	25
RZ	140	870	10 500	4,2	16

Les densités sont exprimées en nombre de micro-colonies par gramme de sol sec à l'air.

Il convient de souligner ici, et ceci est valable pour toutes les déterminations basées sur les numérations, que le seuil de prolifération des microorganismes peut être décalé par rapport au seuil de démarrage de l'activité physiologique. On sait, en effet, que celle-ci est concevable sans multiplication microbienne préalable (90). Il est donc nécessaire de se souvenir de ce que le seuil défini par la méthode de numération est *un seuil de prolifération* (et non un *seuil d'activité physiologique*) qui peut être légèrement déplacé vers les pF plus faibles.

Quoi qu'il en soit, les *Azotobacter chroococcum* apparaissent comme des germes dont les exigences en eau sont, dans beaucoup de sols, au moins égales à celles des végétaux supérieurs.

CHAPITRE III

MINÉRALISATION DE L'AZOTE DANS LE SOL

La plus grande partie de l'azote du sol s'y trouve sous forme organique, ce qui représente dans les sols de l'Ouest africain, où son taux oscille entre 0,2 et 2 pour mille 0,6 à 6 tonnes par hectare pour un horizon de surface d'une vingtaine de centimètres. Or, pour être utilisable par les plantes, cet azote organique doit être minéralisé sous forme ammoniacale ou nitrique. L'ammonification et la nitrification constituent donc des chaînons essentiels du cycle de l'azote.

On sait que la minéralisation des substances organiques du sol est sous la dépendance de leur structure chimique qui est très variable et qu'elle est compliquée par la présence « en proportion parfois élevée de corps carbonés du type des celluloses, hémicelluloses et pectines » qui y sont souvent associées (99).

Comme il n'était évidemment pas question d'étudier systématiquement la minéralisation d'une gamme importante de substances azotées, nous avons dû nous limiter à quelques-unes d'entre elles : la caséine, la tyrosine et une substance végétale complexe (feuilles d'Arachide broyées).

D'après CARLES et DECAU (22), un tiers à deux tiers de l'azote organique du sol sont susceptibles de fournir par hydrolyse des acides aminés ; aussi nous a-t-il semblé logique d'utiliser pour nos essais une substance facile à se procurer, la *caséine*, phospho-protéine qui, par hydrolyse, donne facilement naissance à des acides aminés.

Parallèlement on a effectué des enrichissements avec un acide aminé aromatique, la *tyrosine*, car sa présence dans le sol a été signalée par de nombreux auteurs dont CARLES, DECAU, SOUBIES, GADET, YOUNG et MORTENSEN (21, 126).

Le choix de la substance végétale complexe à incorporer au sol a été guidé par son rapport C/N. On sait, en effet, que la minéralisation de ces substances est sous la dépendance de leur rapport C/N et l'on admet, en général, qu'il n'y a libération d'azote minéral dans le sol que lorsque ce rapport est inférieur à 20 (53, 63). C'est aux *feuilles d'Arachide broyées* que l'on s'est adressé car leur rapport C/N est de l'ordre de 13.

On a réservé pour un chapitre ultérieur consacré aux processus d'immobilisation, l'étude de l'évolution de substances végétales à rapport C/N plus élevé : feuilles d'*Acacia albida* à rapport C/N = 26,7 et feuilles de *Tectona grandis* à rapport C/N = 51,6 (tableau 17).

Bien entendu, les processus de minéralisation de l'*azote organique préexistant naturellement dans le sol* ont dû être examinés, non seulement pour eux-mêmes, mais aussi parce qu'ils interviennent dans les témoins expérimentaux. On a, en effet, déduit, des chiffres de minéralisation obtenus dans les échantillons enrichis, les chiffres provenant des échantillons non enrichis. Ainsi qu'on l'a déjà souligné au chapitre I, par. D, cette façon de procéder présente l'inconvénient inévitable de négliger les interactions entre les processus de minéralisation de l'azote organique ajouté et les

processus de minéralisation de l'azote organique préexistant. Toutefois l'erreur consécutive, est en général, très faible car la quantité d'azote organique ajouté est toujours importante par rapport à la quantité d'azote organique préexistant ; cette erreur est même insignifiante, dans le cas des sols très pauvres en matière organique, tels les sols ferrugineux tropicaux du type DIOR.

TABLEAU 17

Composition des feuilles broyées utilisées pour l'enrichissement des échantillons de sol.

	Arachis hypogea	*Acacia albida*	*Tectona grandis*
N	3,38	1,87	0,94
C	44,1	50,0	48,5
C/N	13,0	26,7	51,6
P	0,33	0,11	0,18
K	3,53	2,49	0,89
Ca	1,25	2,81	2,05
Mg	0,57	0,62	0,39
H	7,4	7,6	6,8

Les résultats sont exprimés en grammes de chaque élément (et non de l'oxyde) pour 100 grammes de matière sèche.

Le chaînon nitrification sera examiné, non seulement dans le cas de la minéralisation des substances organiques, mais aussi dans celui de l'enrichissement du sol en azote ammoniacal sous forme de sulfate d'ammoniaque.

Il est apparu commode de désigner sous le terme d'*ammonitrification*, l'ensemble des processus d'ammonification et de nitrification dans tous les cas où il n'a pas été nécessaire de distinguer si l'azote se minéralisait sous forme ammoniacale ou sous forme nitrique. En ce qui concerne la représentation graphique des résultats, on a toujours tracé les courbes d'ammonitrification, car elles offrent l'avantage de donner immédiatement une image globale complète des processus de minéralisation. Comme on a également dessiné les courbes de nitrification, il est facile d'en déduire l'allure des processus d'ammonification dont l'intensité est représentée par la différence entre les ordonnées de l'ammonitrification (courbes supérieures) et les ordonnées de la nitrification (courbes inférieures).

A. — Le problème de la volatilisation de l'azote ammoniacal

Lorsqu'il n'est pas repris dans le cycle de la nitrification, ni réutilisé par voie biologique, ni dénitrifié, l'azote ammoniacal résultant des processus d'ammonification peut être, soit fixé par les colloïdes du sol sous forme échangeable, soit volatilisé. Si l'on admet, avec Wijler et Delwiche (122), que les processus de dénitrification sont pratiquement nuls, lorsque l'humidité du sol est inférieure au point de flétrissement, les formes d'azote minéral qui échappent à la méthode de dosage utilisée ici (extraction au chlorure de potassium) sont donc d'une part l'azote volatilisé sous forme ammoniacale par suite des phénomènes de diffusion, d'autre part l'azote minéral réutilisé par les microorganismes telluriques. Nous reviendrons sur ce dernier point ultérieurement.

En ce qui concerne la volatilisation de l'azote sous forme ammoniacale, on en a déterminé l'importance, pour trois sols enrichis en caséine et maintenus au pF 4,2, en dosant, suivant la méthode classique (97), l'ammoniac volatilisé et fixé par l'acide sulfurique au cours de l'incubation. Il ressort du tableau 18 :

TABLEAU 18

Volatilisation de l'azote ammoniacal au cours de la minéralisation de la caséine dans trois sols maintenus au pF 4,2.

Type de sol	Enrichissement en caséine exprimé en N	$N\text{-}NH_3$ du sol	$N\text{-}NH_3$ volatilisé	A	
				P = 0,05	P = 0,01
Sol d'argile noire tropicale TH	0	0,3	0	6,9	9,2
	50	0	1,0	6,9	9,2
	150	24,3	0	6,9	9,2
	200	32,0	2,0	6,9	9,2
Sol ferrugineux tropical lessivé DH-59	0	0	1,0	13,4	17,7
	50	18,3	2,0	13,4	17,7
	150	59,7	1,0	13,4	17,7
	200	86,7	38,0	13,4	17,7
Sol faiblement ferrallitique DR	0	0	1,0	14,8	19,7
	50	16,7	14,0	14,8	19,7
	150	52,0	9,7	14,8	19,7
	200	72,0	75,0	14,8	19,7

Les résultats sont exprimés en p.p.m.

a) *que la volatilisation de l'azote ammoniacal n'apparaît que dans les sols à complexe absorbant déficient,* tel que le sol ferrugineux tropical lessivé DH-59, très peu argileux (8 p. 100 d'argile) et pauvre en carbone organique (4,5 pour mille), et surtout le sol faiblement ferrallitique DR dont la teneur en argile (3,5 p. 100) et le taux de carbone (3,4 pour mille) sont encore plus faibles.

b) *que la volatilisation de l'azote ammoniacal ne se manifeste alors que si la dose de caséine exprimée en azote atteint 200 p.p.m.*

La volatilisation de l'azote ammoniacal ne gêne pratiquement pas la détermination du seuil de minéralisation car, au niveau du seuil, la volatilisation est très faible par rapport à l'ammonification globale. Il faudra, par contre, tenir compte de ce phénomène lors de l'interprétation des courbes de minéralisation des sols enrichis en azote organique et caractérisés par un complexe absorbant peu efficace.

B. — Aperçu de la cinétique des processus de minéralisation de l'azote dans le sol

Le problème de l'évolution des processus de minéralisation de l'azote en fonction du temps n'a été abordé que dans les trois cas suivants :

a) minéralisation de l'azote préexistant naturellement dans le sol.

b) minéralisation dans le sol de la caséine.

c) minéralisation dans le sol de la tyrosine.

Dans le cas des *sols non enrichis*, on a observé que le taux de l'azote minéralisé augmentait sensiblement avec le temps. Mais il ne semble exister aucune loi simple régissant l'allure du phénomène. En effet, dans l'un des sols testés (sol PT), un certain ralentissement de la minéralisation se manifeste à la cinquième semaine, alors que

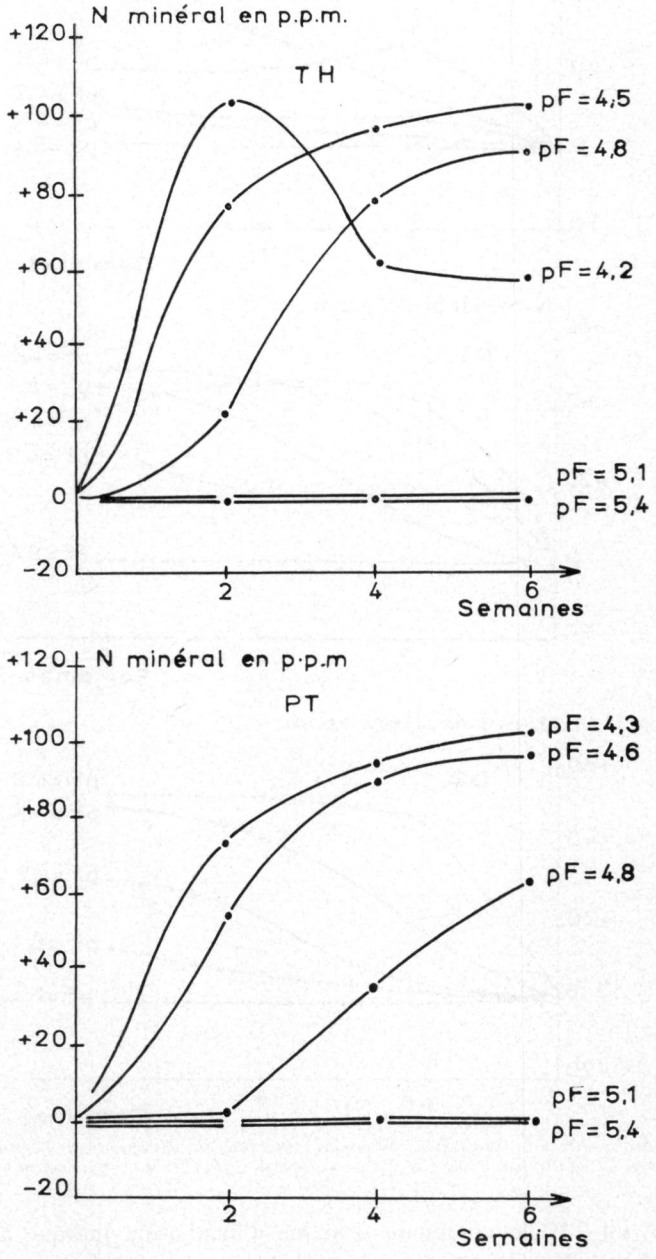


FIG. 10. — *Minéralisation de la* caséine *en fonction du temps dans 2 sols d'argile noire tropicale maintenus à différents pF supérieurs ou égaux à 4,2. De haut en bas : sols d'argile noire tropicale TH et PT.*

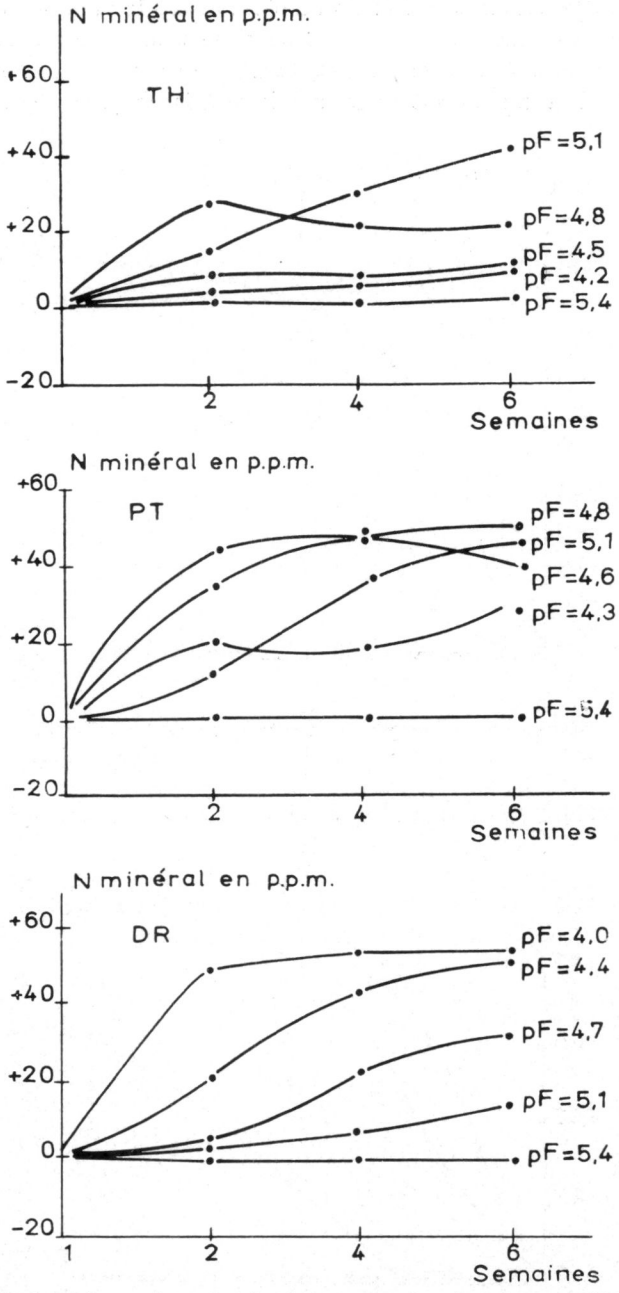


FIG. 11. — *Minéralisation de la* tyrosine *en fonction du temps dans des sols maintenus à différents pF supérieurs ou égaux à 4,0. De haut en bas : sols d'argile noire tropicale TH et PT et sol faiblement ferrallitique DR.*

dans l'autre (sol TH) la cinquième semaine d'incubation marque au contraire le début d'une phase d'accélération.

Les expériences relatives à la *minéralisation de la caséine et de la tyrosine,* synthé-

tisées par les figures 10 et 11, ont mis en évidence une plus grande complexité des processus et plus particulièrement les deux séries de faits suivants :

a) *Dans certains cas, le taux d'azote minéralisé dans le sol n'augmente pas régulièrement avec le temps d'incubation.* C'est ainsi que, pour l'argile noire tropicale TH, au pF 4,2 la teneur du sol en azote minéral total provenant de la minéralisation de la caséine passe un maximum de l'ordre de 100 p.p.m. à la deuxième semaine, puis tend vers une valeur voisine de 60. p. p. m. (figure 10). Il en est de même, toujours avec le sol TH, pour l'azote minéral provenant de la minéralisation de la tyrosine (figure 11).

b) *Le taux d'azote minéralisé dans le sol ne croît pas forcément avec l'humidité.* C'est ainsi que l'on observe très nettement dans le sol TH, une baisse du taux de minéralisation *apparent* au pF 4,2 par rapport au pF 4,8 (figure 10).

Ces phénomènes, à première vue anormaux, seront expliqués au chapitre X.

C. — Les différents seuils caractérisant les processus de minéralisation de l'azote dans le sol

Aux deux chaînons de minéralisation de l'azote organique, correspondent deux seuils dont la définition est évidente :

— *le seuil d'ammonification* ou pF limite pour lequel on observe une augmentation significative du taux d'azote ammoniacal dans le sol ;

— *le seuil de nitrification* ou pF limite pour lequel on observe une augmentation significative du taux d'azote nitrique dans le sol.

Pour les sols caractérisés par une nitrification active, et notamment dans le cas de la minéralisation de l'azote organique préexistant, se présente une difficulté d'interprétation résultant de ce que l'azote organique est entièrement minéralisé sous forme nitrique. Dans ces conditions, la détermination des seuils de nitrification est immédiate ; mais il n'en est pas de même pour l'ammonification. En réalité, l'indétermination relative aux seuils d'ammonification n'est qu'apparente. Elle s'explique par le fait que les phénomènes de nitrification succèdent assez rapidement aux phénomènes d'ammonification pour les masquer, bien que ces derniers les précèdent nécessairement. Il faut donc admettre que les seuils d'ammonification et de nitrification sont alors confondus.

L'exemple le plus typique en est fourni par la minéralisation de l'azote organique préexistant dans les sols d'argile noire (en particulier dans le sol TH) caractérisés par un pouvoir nitrificateur élevé. La figure 16 met bien en évidence l'augmentation significative du taux d'azote nitrique dès le pF 4,9, alors que la teneur en azote ammoniacal — qui est représentée par la différence entre les ordonnées des courbes d'ammonitrification et de nitrification — a, au contraire, tendance à diminuer lorsque le pF diminue, c'est-à-dire lorsque l'humidité augmente. On admet alors que le seuil d'ammonification est confondu avec le seuil de nitrification et qu'il peut être évalué à 4,9.

Par la suite, lorsqu'on aura affaire à des seuils d'ammonification ainsi estimés, on fera figurer les valeurs correspondantes entre crochets pour attirer l'attention sur le fait qu'il ne s'agit pas de valeurs obtenues directement par l'expérience (tableaux 19 et 23).

A côté des seuils d'ammonification et de nitrification, on a noté, dans certains

cas, l'apparition de seuils d'*immobilisation de l'azote minéral global*. Nous reviendrons sur ce problème ultérieurement (chapitre VII). On a déterminé enfin, un *seuil de disparition de la tyrosine* qui présente, à première vue, moins d'intérêt, mais qui a toutefois permis certaines comparaisons intéressantes.

D. — Minéralisation de la caséine

1. — *Technique expérimentale*

Les enrichissements exprimés en mg pour 100 g de sol ont été effectués sur les bases suivantes :

Caséine	127 mg
Mélange minéral SI	3 mg
Carbonate de calcium précipité	500 mg

Le mélange minéral SI a déjà été décrit au chapitre I, par. D. La caséine renfermant 15,8 p. 100 d'azote, cet enrichissement correspond à l'apport de 200 p.p.m. d'azote sous forme organique.

La durée d'incubation adoptée a été de 4 semaines à compter du jour de l'enrichissement. Les trois sols utilisés pour l'étude de la minéralisation de la caséine ont été choisis en raison de leur pouvoir nitrificateur très variable. Élevé dans le cas de l'argile noire tropicale basique TH, ce pouvoir diminue sensiblement dans le cas de l'argile noire tropicale faiblement acide PT, pour n'être que médiocre dans le sol faiblement ferrallitique DR.

2. — *Seuils de minéralisation de l'azote de la caséine*

Les *seuils d'ammonification* sont très rapprochés quels que soient les sols, puisque leurs valeurs sont comprises entre les pF 4,9 et 5,0 (tableau 19).

Par contre, les seuils de *nitrification* varient dans de larges limites entre le pF 4,6 (dans le sol TH dont on a déjà reconnu le pouvoir nitrificateur intense), et un pF compris entre 2,7 et 4,4 dans le sol DR caractérisé par un pouvoir nitrificateur déficient.

3. — *Allure des processus de minéralisation de la caséine*

Aux humidités inférieures au point de flétrissement, il y a un retard très net de la nitrification par rapport à l'ammonification qui se traduit, sur la figure 12, par un décalage spectaculaire entre les courbes d'ammonitrification (courbes supérieures) et les courbes de nitrification (courbes inférieures). Mais au pF 2,7 ce décalage disparaît pour les sols nitrifiant bien (sols d'argile noire TH et PT) ; il s'atténue, mais est encore très important pour le sol DR à pouvoir nitrificateur médiocre.

E. — Dégradation de la tyrosine

1. — *Seuils de minéralisation de la tyrosine*

Les enrichissements exprimés en mg pour 100 g de sol ont été effectués sur les bases suivantes :

Tyrosine	260 mg
Mélange minéral SI	3 mg
Carbonate de calcium précipité	500 mg

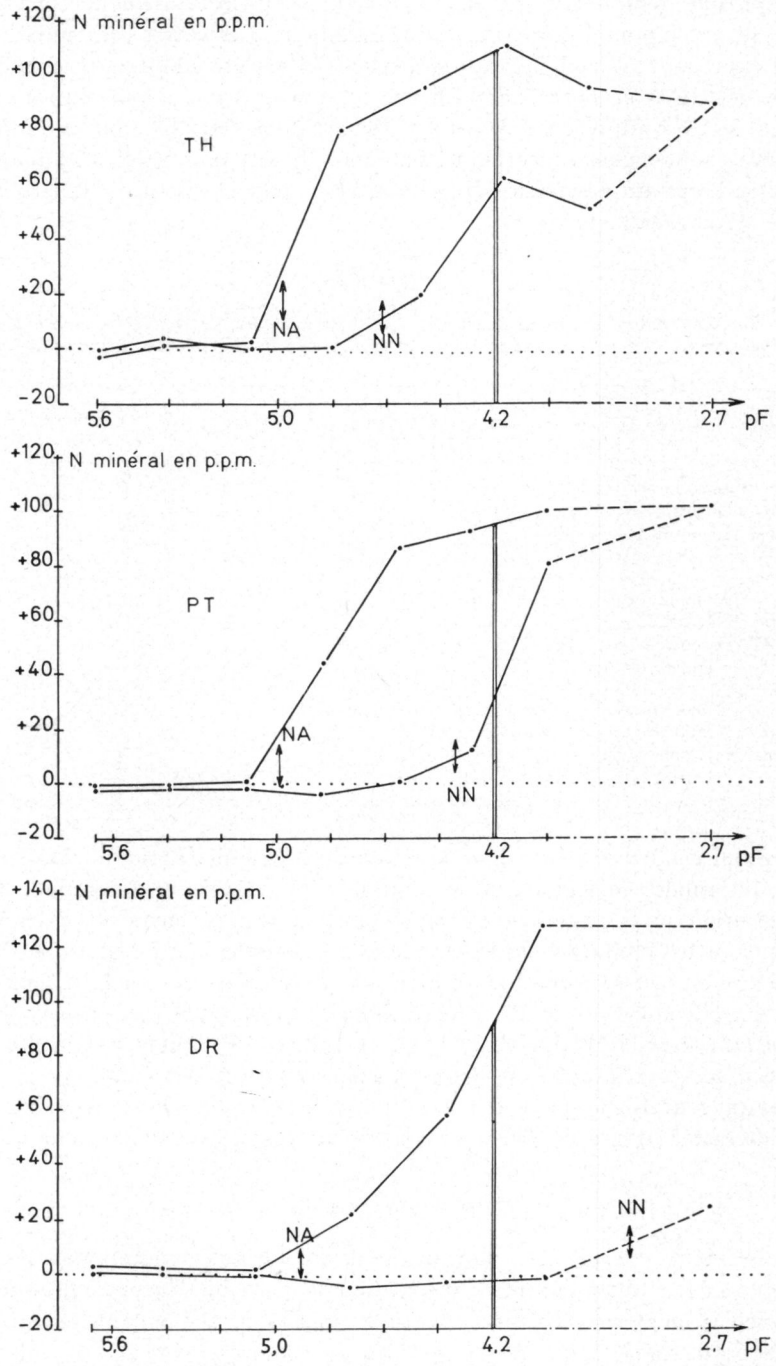


FIG. 12. — *Influence du pF sur l'ammonitrification et la nitrification de la* caséine. *Dans chaque graphique, la courbe supérieure correspond à l'ammonitrification et la courbe inférieure à la nitrification. Les lettres NA indiquent l'emplacement des seuils d'ammonification et les lettres NN celui des seuils de nitrification. De haut en bas : sols d'argile noire tropicale TH, PT et sol faiblement ferrallitique DR.*

La tyrosine renfermant 7,7 p. 100 d'azote, cet enrichissement correspond à un apport de 200 p.p.m. d'azote sous forme organique. Les autres caractéristiques du protocole expérimental sont identiques à celles qui ont été adoptées pour la caséine.

Il découle du tableau 19 et de la figure 13, que les *seuils d'ammonification* sont stabilisés à des pF compris entre 5,0 et 5,3. Ils sont donc, dans les trois cas, supérieurs aux résultats homologues concernant la caséine. On est, dans ces conditions, conduit à penser que le niveau des seuils dépend, au moins partiellement, de la nature de la substance métabolisable testée.

TABLEAU 19

Seuils de minéralisation de l'azote de la caséine, de la tyrosine, des feuilles d'Arachide broyées, de l'azote préexistant naturellement dans le sol et seuils de nitrification du sulfate d'ammoniaque.

Type de sol	Nature du seuil	Caséine	Tyrosine	Arachide	Azote préexist.	Sulfate d'ammon.
Argile noire tropicale TH	Ammonification	5,0	5,2	5,5	[4,9]	—
	Nitrification	4,6	—	—	4,9	4,6
	Immobilisation de l'azote nitrique...	—	4,3	5,2	—	—
Argile noire tropicale PT	Ammonification	5,0	5,3	5,5	[4,8]	—
	Nitrification	4,3	—	—	4,8	4,3
	Immobilisation de l'azote nitrique...	—	4,4	4,8	—	—
Sol faiblement ferrallitique DR	Ammonification	4,9	5,0	5,5	[4,8]	—
	Nitrification	$2,7 < S < 4,4$	—	—	4,8	$2,7 < S < 3,7$
	Immobilisation de l'azote nitrique...	—	2,7	$2,7 < S < 4,0$	—	—

En ce qui concerne la *nitrification*, on observe une diminution du taux d'azote nitrique par rapport au témoin, de sorte qu'il a été possible de déterminer un seuil d'immobilisation qui se situe à un pF supérieur à 4,2 pour les deux sols d'argile noire et au voisinage de l'humidité équivalente pour le sol faiblement ferrallitique DR.

La figure 13 fait ressortir l'apparition, sur les courbes d'ammonitrification des deux sols d'argile noire TH et PT, *d'un maximum très net* placé entre les pF 5,0 et 4,2 suivi *d'un minimum* situé entre les pF 4,2 et 2,7. On expliquera ce phénomène au chapitre consacré aux interactions des cycles du carbone et de l'azote.

En ce qui concerne les phénomènes d'immobilisation, on remarquera simplement que leur intensité, faible aux pF élevés, s'accentue très nettement jusqu'au pF 2,7.

2. — *Seuils de disparition de la tyrosine*

Parallèlement au seuil de démarrage de la minéralisation qu'on vient d'étudier, on a cherché à déterminer un seuil de disparition de la tyrosine incorporée au sol.

L'enrichissement des échantillons a été effectué aux doses suivantes exprimées en mg pour 100 g de sol :

Tyrosine	32,3 mg
Mélange minéral SI	0,4 mg
Carbonate de calcium précipité	66,2 mg

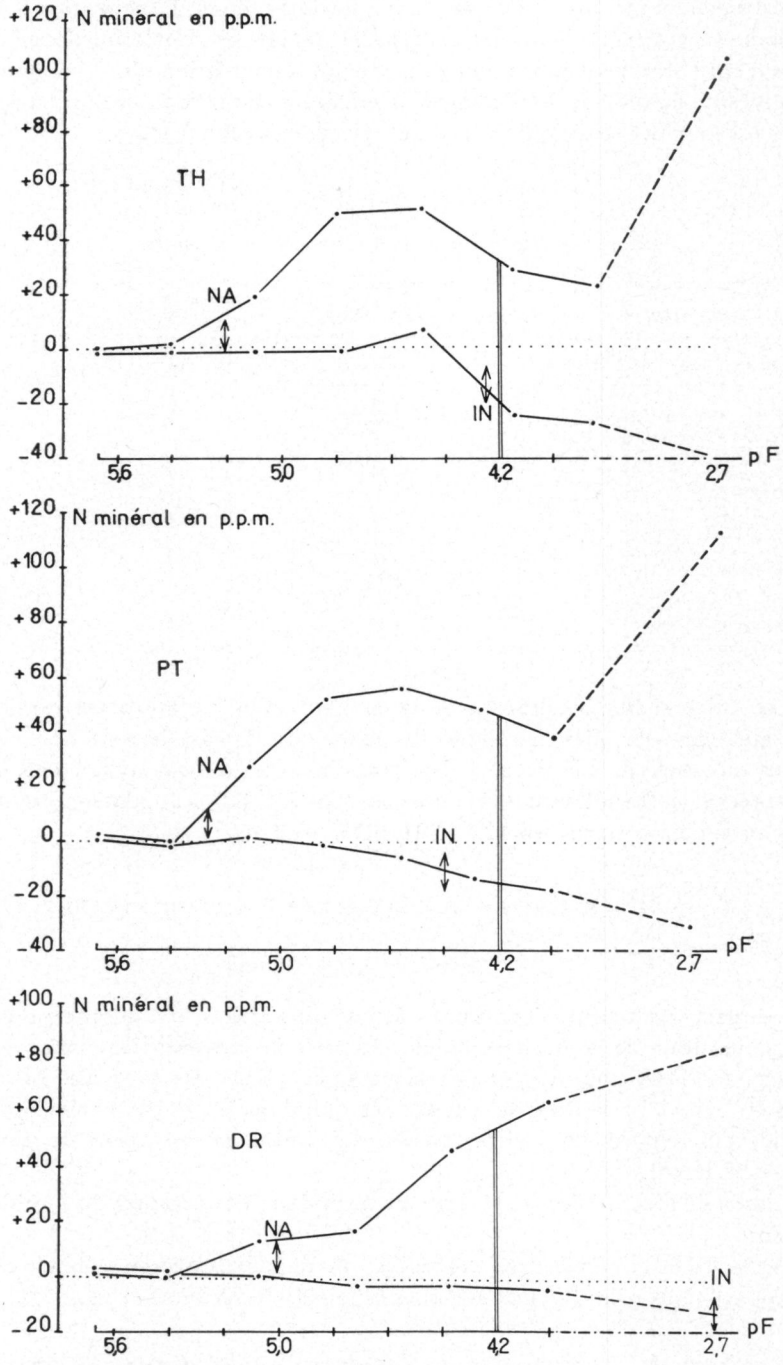


FIG. 13. — *Même protocole expérimental et mêmes sols que dans le cas de la figure 12, mais la caséine a été remplacée par la* tyrosine. *Les lettres NA indiquent l'emplacement des seuils d'ammonification et les lettres IN celui des seuils d'immobilisation de l'azote nitrique.*

ce qui correspond à un apport d'azote organique de 25 p.p.m. L'incubation a été fixée à six semaines. On a examiné au chapitre I, par. F, les raisons pour lesquelles on a adopté une dose d'enrichissement plus faible et un temps d'incubation plus long que dans le cas de la mesure du seuil de démarrage de la minéralisation. Le tableau 20 donne, pour 8 sols, les niveaux des seuils qui s'échelonnent entre les pF 3,7 et 4,9.

TABLEAU 20

Seuils de disparition de la tyrosine en six semaines.

Type de sol	Référence	H %	pF
Sol ferrugineux tropical non lessivé	TV	1,5	4,2
Sol ferrugineux tropical lessivé	DH	1,9	4,0
	SOR-10	3,1	3,7
Sol ferrallitique	DR	1,6	4,3
	SF	3,1	4,6
	KA	14,0	4,3
Sol d'argile noire	TH	8,7	4,9
	PT	5,8	4,8
Sol hydromorphe typique.....	KB	8,8	4,7

En ce qui concerne les différences de comportement parfois assez considérables existant entre les sols, elles s'expliquent, comme dans le cas, du seuil de démarrage, par le fait que certains d'entre eux disposent d'associations microbiennes xérophiles bien adaptées à la dégradation de la tyrosine (sols TH, PT, KB) alors que d'autres ne sont pas aussi bien pourvus (sols TV, DH, SOR-10, DR).

F. — Minéralisation des feuilles d'Arachide broyées

1. — *Technique expérimentale*

La plupart des auteurs dont Shaw, Robinson, Simon, ont adopté, pour l'étude de la décomposition de la matière organique dans le sol ,des enrichissements de l'ordre de 1 à 2 p. 100 (108, 109). Les enrichissements en substances végétales broyées ont toujours été faits ici à la dose de 1 p. 100, ce qui, dans le cas particulier des feuilles d'Arachide qui renferment 3,38 p. 100 d'azote, constitue un apport de 338 p.p.m. d'azote (tableau 17).

La durée de l'incubation a été fixée à 4 semaines pour compter du jour de l'enrichissement.

L'étude de la minéralisation des feuilles d'Arachide broyéees a été effectuée sur 11 sols appartenant à 5 types pédologiques différents (tableau 21 et figure 14).

2. — *Seuils de minéralisation de l'azote des feuilles d'Arachide broyées*

Le tableau 21 montre que les *seuils d'ammonification* des feuilles d'Arachide broyées se situent entre les pF 5,2 et 5,5. Il est intéressant de souligner, dès main-

tenant, que ces seuils sont encore plus élevés que les seuils homologues déterminés pour la caséine ou la tyrosine.

De même que la tyrosine, les feuilles d'Arachide broyées ne nitrifient pas mais provoquent une *immobilisation de l'azote nitrique* préexistant ou se formant dans le sol pendant l'incubation. On a cherché à déterminer les seuils d'immobilisation des nitrates. Mais ceux-ci se sont révélés très variables : ils vont, en effet du pF 5,2 au pF 2,7. La cause de cette dispersion est due au fait que chaque sol est caractérisé par un potentiel nitrificateur qui lui est propre. En effet, aux seuils supérieurs à 4,2, correspondent les sols dont la teneur en azote minéral et minéralisable sous forme nitrique est supérieure à 30 p.p.m., et inversement (tableau 15). On conçoit aisément que, si la dose d'azote nitrique dans le sol est faible, alors que l'erreur expérimentale reste relativement élevée, les seuils se trouvent décalés vers les fortes humidités.

TABLEAU 21

Seuils d'ammonification et d'immobilisation des nitrates dans des échantillons de sol enrichis en poudre de feuilles d'Arachide.

Type de sol	Référence	Ammonification	Immobilisation de l'azote nitrique
Sol ferrugineux tropical non ou peu lessivé	TV	5,2	4,0
	DIOR	5,5	—
Sol ferrugineux tropical lessivé	DH	5,2	$2,7 < S < 4,1$
	SOR-10	5,6	4,0
Sol ferrallitique	DR	5,5	$2,7 < S < 4,0$
	SF	5,6	4,2
	KA	5,6	5,2
Sol d'argile noire	TH	5,5	5,2
	PT	5,5	4,8
Sol hydromorphe typique	KB	5,6	4,6
	SOR-130	5,6	3,9

3. — *Allure des processus de minéralisation des feuilles d'Arachide broyées*

Les courbes de minéralisation des feuilles d'Arachide broyées, dont la figure 14 donne quelques exemples typiques, présentent une grande analogie avec les courbes de minéralisation de la tyrosine (figure 13). On retrouve encore la présence dans la plupart des sols, d'un *maximum d'ammonitrification* très net correspondant ici à, pF un supérieur à 4,6 *suivi d'un minimum* souvent situé au voisinage du point de flétrissement, mais pouvant se déplacer dans les cas extrêmes du pF 4,8 au pF 2,7.

G. — Nitrification de l'azote ammoniacal apporté sous forme de sulfate d'ammoniaque

1. — *Technique expérimentale*

Les enrichissements exprimés en mg pour 100 g de sol ont été effectués sur les bases suivantes :

Sulfate d'ammoniaque	95 mg
Mélange minéral SI	3 mg
Carbonate de calcium précipité	500 mg

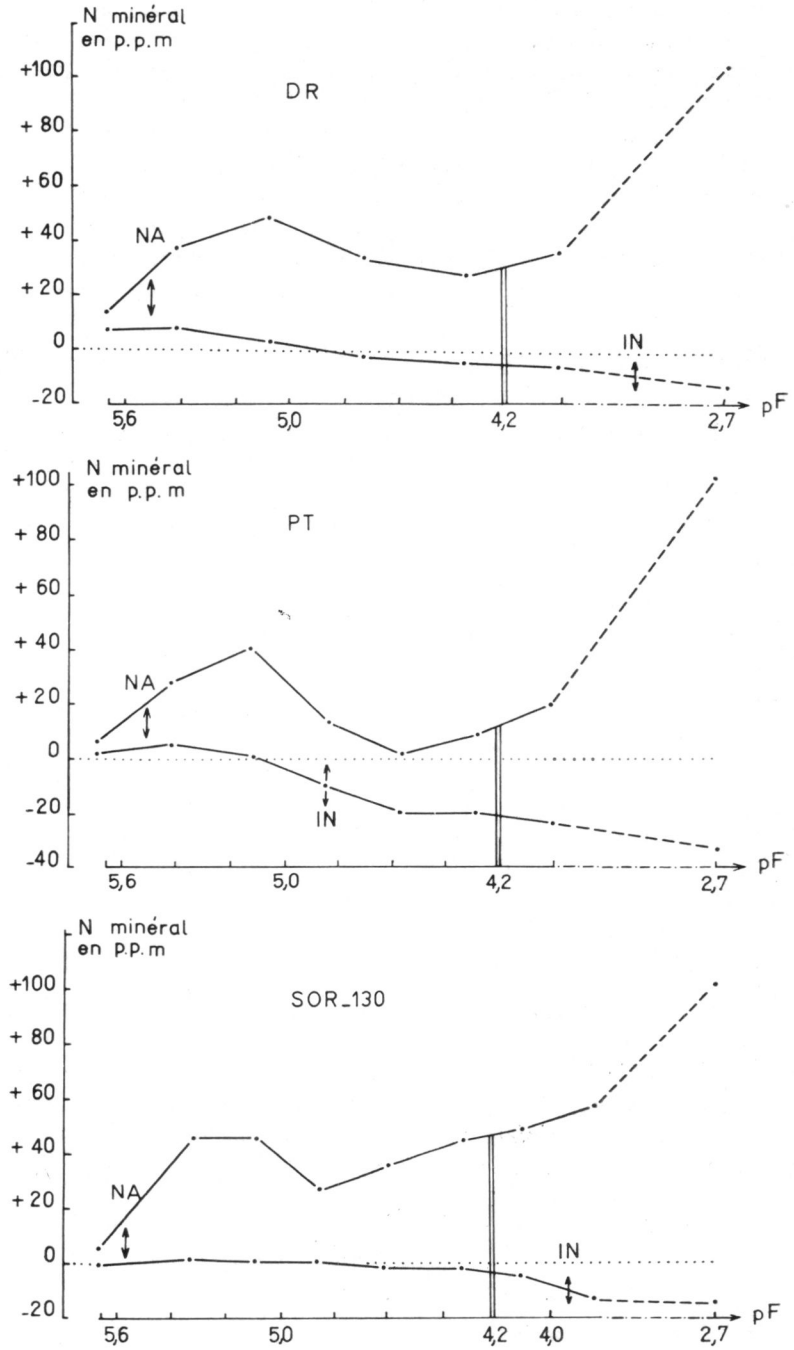


FIG. 14. — *Influence du pF sur la minéralisation de l'azote contenu dans les feuilles d'Arachide broyées. Dans chaque graphique, la courbe supérieure correspond à l'ammonitrification et la courbe inférieure à la nitrification. Les lettres NA indiquent l'emplacement des seuils d'ammonification et les lettres IN celui des seuils d'immobilisation de l'azote nitrique. De haut en bas : sol faiblement ferrallitique DR, sol d'argile noire tropicale PT et sol hydromorphe typique SOR-130.*

ce qui correspond à un apport de 200 p.p.m. d'azote sous forme ammoniacale.

Après 4 semaines d'incubation, on a effectué les dosages d'azote ammoniacal et nitrique sur 12 sols appartenant à 6 types pédologiques différents (tableau 22 et figure 15).

TABLEAU 22

Seuils de nitrification du sulfate d'ammoniaque.

Type de sol	Référence	Seuil
Sol brun subaride	BB	4,3
	BR	$2,7 < S < 3,6$
Sol ferrugineux tropical non ou peu lessivé	TV	$2,7 < S < 4,0$
	DIOR	$2,7 < S < 3,8$
Sol ferrugineux tropical lessivé	DH	$2,7 < S < 3,7$
Sol ferrallitique	DR	$2,7 < S < 3,7$
	SF	$2,7 < S < 3,9$
	KA	$S < 2,7$
Sol d'argile noire tropicale	TH	4,7
	PT	4,3
	BAN	4,2
Sol hydromorphe typique	SOR-130	4,0

A titre de vérification, on a effectué des numérations de la microflore nitrifiante, par la technique en milieu liquide de COPPIER et de BARJAC (27) modifiée sur 3 sols enrichis en sulfate d'ammoniaque et 2 sols enrichis en urée.

2. — *Seuils de nitrification*

Il résulte de l'examen du tableau 22 et de la figure 15 que les seuils de nitrification se déplacent sur une large gamme de pF comprise entre 4,7 et 2,7. Il faut voir là, la conséquence de la variabilité de la composition de la microflore nitrifiante suivant les sols. Contrairement à ce que l'on pensait il y a quelques années, il semble, en effet, que la nitrification ne soit pas le monopole de quelques germes du groupe *Nitrosomonas* et *Nitrobacter*, puisqu'on a découvert qu'un certain nombre d'hétérotrophes étaient capables de former des nitrates, soit à partir de l'azote organique, soit même à partir de l'ammoniac (99). La nitrification peut être le fait de Bactéries, d'Actinomycètes ou de Champignons, microorganismes dont on connaît la diversité des exigences écologiques.

Quoiqu'il en soit, les seuils de nitrification sont, pour la plupart, voisins du pF 4,2 ou inférieurs à ce pF. Ils correspondent donc à un pF beaucoup plus faible que les seuils d'ammonification. On comprend facilement que, dans ces conditions, lors du dessèchement du sol, la nitrification disparaisse avant l'ammonification. La nitrification ne se poursuit au-delà du pF 4,3 que dans les sols dotés d'une microflore nitrifiante, à la fois active et xérophile, comme c'est le cas pour les sols d'argile noire et, à un degré moindre, pour le sol brun subaride BB.

La méthode microbiologique utilisée parallèlement à la méthode biochimique a donné des résultats parfaitement concordants dans le cas des argiles noires, que l'enrichissement soit effectué à partir du sulfate d'ammoniaque ou de l'urée. Avec les sols

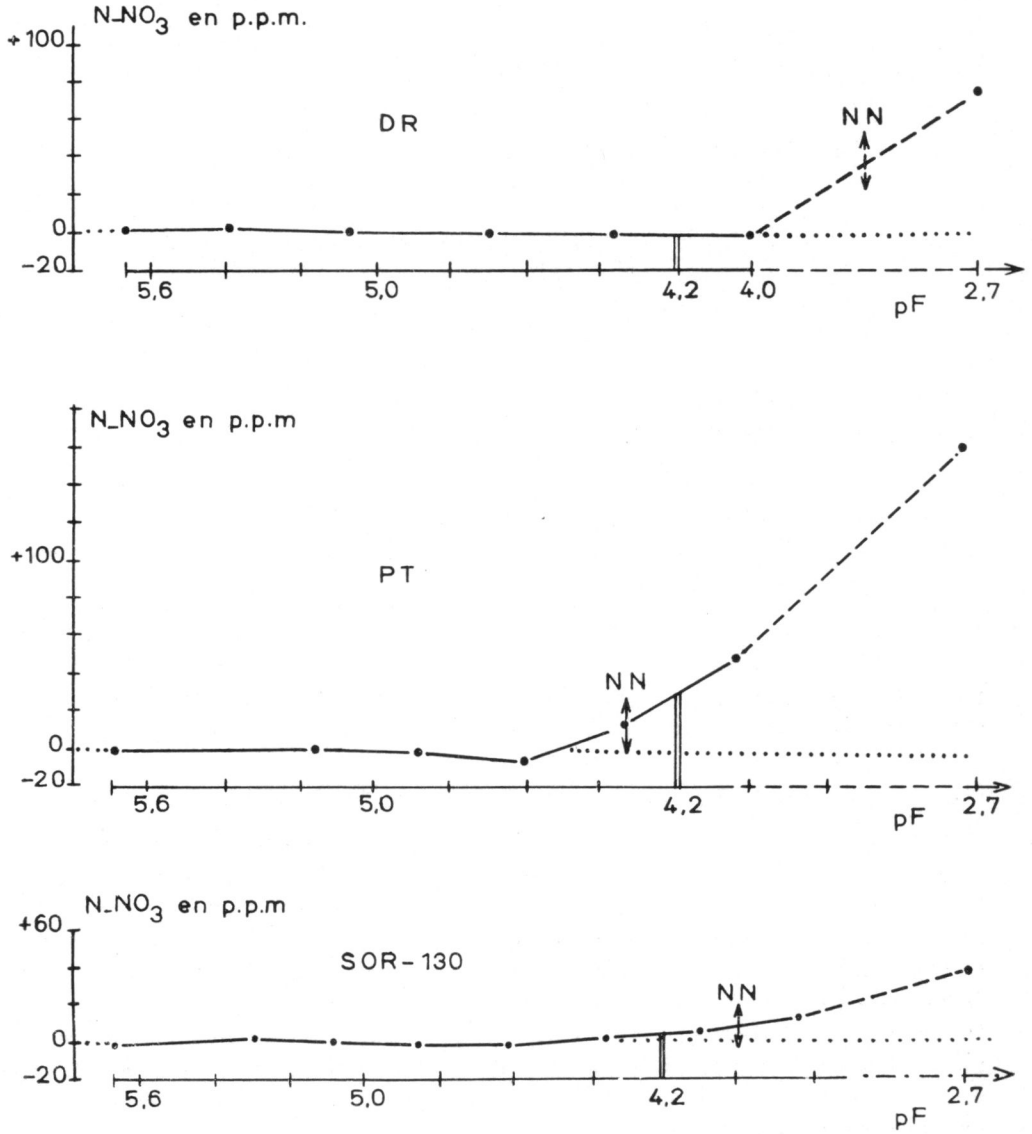


FIG 15. — *Influence du pF sur la nitrification du sulfate d'ammoniaque. Les lettres NN indiquent l'emplacement des seuils de nitrification. De haut en bas sol faiblement ferrallitique DR, sol d'argile noire tropicale PT, sol hydromorphe typique SOR-130.*

bruns subarides (BB) et avec les sols ferrugineux tropicaux (DH), on a observé un abaissement du seuil de près d'une unité. Mais la conclusion générale reste la même, à savoir que les seuils de nitrification correspondent à un pF beaucoup plus faible que les seuils d'ammonification.

H. — Minéralisation de l'azote organique préexistant naturellement dans le sol

1. — *Technique expérimentale*

Les échantillons de sol non enrichis ont été soumis à une incubation de cinq semaines, la première semaine correspondant à la semaine d'équilibre dans le cas des échantillons enrichis.

Quinze sols appartenant à six groupes pédogénétiques différents ont été étudiés.

2. — *Seuils de minéralisation de l'azote organique préexistant dans le sol*

Il résulte de l'examen du tableau 23 que *les seuils déterminés dans les sols non enrichis sont très dispersés :* ils s'échelonnent entre les pF 4,9 et 2,7. Comment expliquer ces variations à la lumière des résultats antérieurs ?

On a vu que le niveau des *seuils d'ammonification* varie non seulement en fonction du type de sol, mais aussi en fonction du type de matière organique incorporée. C'est ainsi que le seuil de minéralisation de l'Arachide est plus élevé que celui de la tyrosine, qui est lui-même plus élevé que celui de la caséine. On sait, d'autre part, depuis les travaux de Michoustine, que les sols sont caractérisés par des associations microbiennes très diverses (89). Il est donc permis de penser qu'à des sols appartenant à des types pédologiques différents, possédant des microflores variées et caractérisés chacun par une matière organique de composition particulière, correspondent des seuils situés à des niveaux différents.

TABLEAU 23

Seuils d'ammonification et de nitrification de l'azote organique préexistant déterminés dans des échantillons de sol non enrichis

Type de sol	Référence	Ammonification	Nitrification
Sol brun subaride	BB	[4,6]	4,6
	BR	[4,3]	4,3
Sol ferrugineux tropical non ou peu lessivé	TV	[2,7 < S < 4,0]	2,7 < S < 4,0
	DIOR	[2,7 < S < 4,0]	2,7 < S < 4,0
Sol ferrugineux tropical lessivé	DH	[2,7 < S < 4,0]	2,7 < S < 4,0
	SOR-10	[3,9]	3,9
Sol ferrallitique	DR	[4,8]	4,8
	SF	4,5	2,7 < S < 4,2
	KA	4,5	—
Sol d'argile noire	TH	[4,9]	4,9
	PT	[4,8]	4,8
	PT-61	[4,5]	4,5
	BAN	[4,4]	4,4
Sol hydromorphe typique	KB	4,5	4,3
	SOR-130	4,5	4,0

Il est possible de distinguer dès à présent :

a) *les sols à seuil d'ammonification peu élevé* (inférieur à 4,2) :

— sols ferrugineux tropicaux non lessivés : TV et DIOR ;

— sols ferrugineux tropicaux lessivés : DH et SOR-10.

b) *les sols à seuil d'ammonification élevé* (compris entre 4,2 et 4,9) :

— sols bruns subarides : BB et BR ;

— sols ferrallitiques : DR, SF et KA ;

— sols d'argile noire : TH, PT, PT-61 et BAN ;

— sols hydromorphes typiques : KB et SOR-130.

Nous qualifierons elliptiquement l'azote organique du premier groupe de sol du terme *hygrominéralisable* alors que, dans le deuxième cas, nous emploierons le terme de *xérominéralisable.*

Le caractère d'hygrominéralisation ou de xérominéralisation n'est pas seulement lié à la nature de la matière organique, mais aussi à l'équipement microbiologique du sol ainsi qu'à diverses autres propriétés physiques et chimiques du milieu édaphique.

Si l'on compare l'importance relative du pouvoir ammonifiant et du pouvoir nitrificateur, on peut distinguer :

a) *les sols à ammonification prépondérante,* caractérisés par un décalage important entre la courbe d'ammonitrification (courbe supérieure) et la courbe de nitrification (courbe inférieure), les plus représentatifs étant les sols hydromorphes typiques (figure 16, sol SOR-130).

b) *les sols à nitrification prépondérante,* caractérisés par des courbes d'ammonitrification et de nitrification rapprochées, à très rapprochées l'une de l'autre, les plus typiques étant les sols d'argile noire tropicale (fig. 16, sol TH).

Alors que dans les expériences antérieures l'enrichissement masquait partiellement les propriétés intrinsèques du sol, celles-ci apparaissent avec netteté dans les essais de minéralisation sans enrichissement. L'on conçoit facilement alors que, les sols testés appartenant à des catégories pédologiques très différentes, l'allure des courbes de minéralisation soit extrêmement variable.

I. — Comparaison des seuils d'ammonification et de nitrification

1. *Seuils d'ammonification*

Ils sont très nettement liés à la nature de la matière organique azotée. C'est ainsi qu'on peut classer, dans l'ordre croissant suivant, les seuils de minéralisation des trois substances organiques essayées :

a) *caséine :* pF 4,9 à 5,0, soit une tension de 79 à 100 atmosphères ;

b) *tyrosine :* pF 5,0 à 5,3, soit une tension de 100 à 200 atmosphères ;

c) *poudre de feuilles d'Arachide :* pF 5,2 à 5,5, soit une tension de 160 à 400 atmosphères.

Quant à *l'azote organique préexistant dans le sol,* sa nature est tellement variable qu'il est impossible de prédire le seuil correspondant sauf, bien entendu, si l'on connaît parfaitement le type de sol lui-même. C'est ainsi que l'on a pu démontrer que les sols d'argile noire tropicale sont, à l'inverse des sols ferrugineux tropicaux lessivés, caractérisés par des seuils d'ammonification de l'azote organique préexistant relativement élevés (tableau 23).

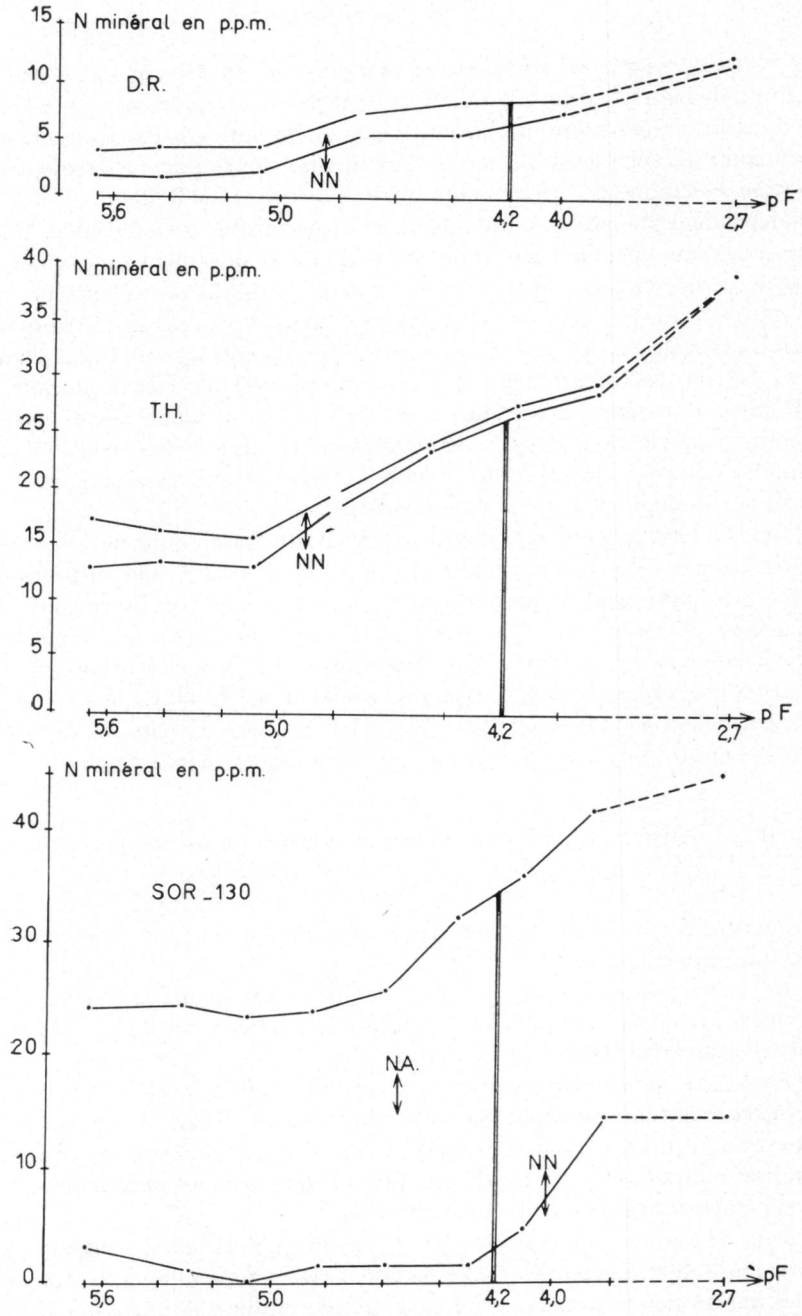


FIG. 16. — *Influence du pF sur l'ammonitrification et la nitrification de l'azote organique préexistant dans le sol. Dans chaque graphique, la courbe inférieure correspond à la nitrification et la courbe supérieure à l'ammonitrification. Les lettres NA indiquent l'emplacement des seuils d'ammonification, les lettres NN celui des seuils de nitrification. De haut en bas : sol faiblement ferrallitique DR, sol d'argile noire tropicale TH et sol hydromorphe typique SOR-130.*

2. — *Seuils de nitrification*

Ils *se situent en général au voisinage ou au-dessous du pF* 4,2, soit à une tension égale ou inférieure à 16 atmosphères. Mais ils peuvent atteindre des pF un peu plus élevés, dans les argiles noires par exemple. On a déjà noté que ces seuils étaient sous la dépendance du type de sol, et qu'ils étaient sans doute particulièrement liés à la composition spécifique de la microflore nitrifiante correspondante.

Ils dépendent aussi de la nature de la substance azotée minéralisable. Mais cette influence n'est pas bien élucidée. Dans le cas de l'enrichissement en caséine et dans celui de l'enrichissement en sulfate d'ammoniaque, les seuils sont identiques dans les mêmes sols (tableau 19). Mais, si l'on compare à ces chiffres ceux qui correspondent à la minéralisation de l'azote préexistant dans le sol, on constate un décalage de 0,3 à 0,4 unité pF vers les faibles humidités. Ce décalage n'est pas très important, mais il est suffisant pour attirer l'attention sur le fait que des facteurs, autres que le type pédologique, interviennent dans la détermination du niveau des seuils. Il est probable que la nature de la substance organique joue un rôle aussi important que la composition spécifique de la microflore nitrifiante.

Si l'on compare le seuil de nitrification du sulfate d'ammoniaque — engrais d'un usage très fréquent dans la pratique agricole — et le seuil d'ammonification d'une substance organique quelconque, on constate un décalage parfois considérable qui peut dépasser une unité pF. On conçoit très bien que, dans ces conditions, lors du dessèchement du sol, la nitrification cesse alors que l'ammonification peut se poursuivre assez longtemps, et l'on s'explique aisément les résultats des observations déjà anciennes de GREAVE et CARTER (50) et des travaux récents de ROBINSON au Kenya (100) et MEYER au Congo (88) déjà signalés dans l'introduction.

J. — IMPORTANCE ET NATURE DES PROCESSUS DE MINÉRALISATION DE L'AZOTE AUX FAIBLES HUMIDITÉS

L'intensité de la minéralisation aux faibles humidités peut être considérable. En voici quelques exemples :

a) *En ce qui concerne la tyrosine,* la minéralisation au pF 4,8 dans le sol TH représente 47 p. 100 de la minéralisation au pF 2,7. Dans le sol PT ce rapport est de 44 p. 100 et dans le sol DR il est de 23 p. 100.

b) *En ce qui concerne les feuilles d'Arachide,* la minéralisation au pF 5,2 dans le sol TH représente 21 p. 100 de la minéralisation au pF 2,7. Dans le sol PT ce rapport est de 37 p. 100 et, dans le sol DR, il est de 43 p. 100. Dans le sol KA, il n'y a minéralisation qu'au-dessus du pF 4,4 ; aux pF plus bas, les phénomènes d'immobilisation l'emportent sur ceux de minéralisation.

c) *Dans le cas des sols non enrichis,* on a vu qu'il fallait distinguer les sols à azote organique hygrominéralisable et les sols à azote organique xérominéralisable. Parmi les argiles noires tropicales qui sont caractéristiques de cette deuxième catégorie, signalons, par exemple, que la minéralisation, au pF 4,8 dans le sol TH, représente 13 p. 100 de la minéralisation au pF 2,7. Dans le sol PT ce rapport s'élève à 24 p. 100. Les résultats concernant le sol DR sont entachés d'une erreur par excès due au développement relativement important des phénomènes de volatilisation de

l'azote ammoniacal au pF 2,7. On ne devra donc les considérer que comme des ordres de grandeur.

La nature biologique des processus de minéralisation aux faibles humidités a été vérifiée sur des échantillons de sol stériles et non stériles soumis à une incubation de 4 semaines à 30°C au pF 4,9. Après cette incubation, on constate, en effet, dans les échantillons de sol non stériles, une augmentation de 28 p.p.m. du taux d'azote minéral alors que, dans les échantillons stérilisés à l'autoclave ou traités avec un antibiotique (streptomycine) et un antifongique (Cu-8-oxyquinoléine), il n'y a aucune modification significative du taux d'azote minéral (tableau 24). Un autre indice de l'intervention des microorganismes dans les processus qui se déroulent à ces faibles humidités, réside dans le fait qu'on observe leur prolifération massive parallèlement à la minéralisation contrôlée par voie chimique.

TABLEAU 24

Vérification de la nature biologique des processus d'ammonification au pF 4,9 dans un sol l'argile noire tropicale (TH-T) enrichi en tyrosine à la dose de 0,26 %.

Traitement	Modification du taux d'azote ammoniacal après une incubation de 4 semaines
Sol non stérile	+ 28,1 p.p.m.
Sol stérilisé à l'autoclave	+ 4,2 p.p.m.
Sol traité à la streptomycine (3 %) et au Cu-8-oxyquinoléine (1 %)	— 3,0 p.p.m.
A (P = 0,05)	5,1

Lorsque l'humidité du sol est insuffisante, il n'y a plus minéralisation de l'azote par voie biologique. On peut alors se demander si la matière organique continue à évoluer sous l'influence de facteurs physiques, tels que le rayonnement infrarouge ou les radiations solaires. Dans une note publiée récemment, nous avons examiné,

TABLEAU 25

Influence du rayonnement infrarouge sur la teneur du sol en azote minéral global extractible par la méthode classique.

Type de sol	Référence	Teneur en azote minéral ($N - NH_3 + N - NO_3$) en p.p.m.		
		Sol non exposé	Sol exposé 7 jours en boîtes de Pétri ouvertes	A (P = 0,01)
Sol ferrugineux tropical non lessivé	DIOR-60	6,2	9,9 (+ 60 %)	1,4
Sol faiblement ferrallitique	DJF	12,5	17,0 (+ 36 %)	1,6
Sol d'argile noire	PT-60	4,0	9,0 (+ 125 %)	5,3
	BAN-59	3,7	11,0 (+ 197 %)	2,0
	BAN-R	12,0	24,7 (+ 106 %)	6,7
Sol hydromorphe typique	C	6,0	15,7 (+ 162 %)	1,4

dans des sols de l'Afrique Occidentale, *l'influence du rayonnement infrarouge sur la teneur du sol en azote minéral* extractible, suivant la méthode classique, par le chlorure de potassium (13). Il ressort du tableau 25 que l'augmentation du taux d'azote minéral extractible peut atteindre, dans les conditions expérimentales où nous nous sommes placé, jusqu'à deux fois le taux initial. On a vu ailleurs (37) que l'azote minéral ainsi libéré l'est presque exclusivement sous forme ammoniacale.

L'augmentation la plus forte observée, dans le cas d'une exposition de 83 jours au rayonnement solaire à Hann-Dakar, a été de 36 p. 100 dans un sol hydromorphe de Guinée.

Ces expériences qui confirment de façon éclatante celles que DROUINEAU et ses collaborateurs (41) ont réalisées, il y a une dizaine d'années, sous climat méditerranéen, démontrent que les horizons de surface peuvent subir, du fait des radiations solaires, des modifications qui se superposent ou font suite aux processus évolutifs d'origine biologique.

Ces résultats sont à rapprocher de ceux de BIRCH (14, 15) sur l'influence du dessèchement du sol sur la décomposition de l'humus et la nitrification. Cet auteur a montré, en effet, que le dessèchement du sol y entraînait des transformations se traduisant, lors de la réhumidification, par un accroissement de la minéralisation de l'azote et du carbone. Ces transformations, qui consistent essentiellement en un accroissement de la teneur en matière organique soluble dans l'eau, sont d'autant plus importantes que la période de sécheresse est plus longue.

En ce qui concerne l'importance de l'oxydation non biologique de l'ammoniac dans le sol, les différents auteurs sont loin d'être d'accord. Soulignons que WAKSMAN, cité par MORTLAND, estime que ce processus serait insignifiant, comparé aux processus biologiques (91).

L'étude de ces modifications d'origine physico-chimique sort du cadre de ce travail, mais il convenait de les signaler ici en raison de leur intérêt dans toutes les régions où la saison sèche est bien caractérisée.

(à suivre)

Ann. Agron. 1962, **13** (4), 325-346

631. 461.5 : 633. 18 (44)

SUR LE PHÉNOMÈNE DE FIXATION DE L'AZOTE DANS LES RIZIÈRES DE CAMARGUE

Thérèse ROUQUEROL
avec la collaboration technique de Renée GOURMAY

Laboratoire de Recherches de la Chaire de Botanique et de Pathologie végétale,
Centre de Recherches agronomiques du Midi,
École nationale supérieure agronomique, Montpellier (Hérault).

SOMMAIRE

Cette étude a pour but de rechercher quels sont les organismes fixateurs d'azote dans les rizières de Camargue.

Il apparaît que ce sont les *Azotobacter* et les *Clostridium* qui, dans ces conditions de sol et de climat, sont les plus actifs.

Les techniques employées pour les dénombrer sont décrites, de même que celles utilisées pour apprécier les capacités fixatrices des boues de rizières.

Populations bactériennes et capacité fixatrice subissent des fluctuations attribuables soit à des changements saisonniers (température), soit à des facteurs provenant du sol lui-même (submersion ou application d'éléments tels que le molybdène).

On peut espérer améliorer les processus de fixation d'azote en intervenant sur ces derniers facteurs.

I. — INTRODUCTION

Le riz est encore cultivé dans beaucoup de régions du globe avec un apport faible, ou même sans aucun apport d'éléments fertilisants, d'azote en particulier. Or, l'on sait que, si l'on ne founit aucun apport d'azote, la récolte se stabilise au voisinage d'un certain niveau.

L'importance des organismes qui s'opposent, dans la rizière, à l'appauvrissement du sol en azote est connue depuis longtemps. On a souvent attribué aux Cyanophycées un rôle primordial dans les rizières de la zone tropicale (ALLISON et MORIS (1930) — DE (1936-1939) — HARADA, ODUKA et YAMAGUCHI (1955-56) — PRASAD (1949) — SINGH (1942) — WATANABE, NISHIGAKI, KONISHI (1950-1951-1956). Mais les *Azotobacter* ont été reconnus aussi comme agents importants de cette fixation (UPPAL, PATEL et DAJI)1939) — DE et DATTA BISWAS (1952) — DE et PAIN (1936) — DE et

BOSE (1938) — SAHASRA BUDDHE et ABBYANKAR (1936) — WILLIS et GREEN (1948).

Nous avons au cours de ce travail, recherché quels étaient les organismes fixateurs prédominants dans les rizières de Camargue (Algues, *Azotobacter*, *Clostridium*), puis les fluctuations numériques de ces germes au cours de l'année et dans difiérentes stations.

Nous avons également cherché à évaluer leur pouvoir fixateur aux différentes périodes de l'année en nous plaçant, si possible, dans des conditions pouvant nous renseigner sur leur activité en rizière.

Enfin nous avons étudié l'influence de certains facteurs susceptibles d'intervenir dans l'orientation de ces phénomènes (action du molybdène par exemple).

Caractéristiques physiques et climatiques des rizières de Camargue

Le sol de la Camargue est formé dans son ensemble d'alluvions modernes dont la composition varie peu d'un point à un autre. Les sables marins charriés par vents et courants entrent pour une grande part dans la constitution des cordons littoraux du sud de la Camargue. Les sols sont plus compacts et plus argileux à mesure que l'on s'éloigne de la mer.

Certaines rizières sont établies sur des formations qui débordent de la Camargue. Il en existe dans la région d'Arles sur des alluvions des plateaux ainsi qu'en certains points de la Crau.

Le travail qui suit a été fait en grande partie dans un mas de petite Camargue (rive droite du petit Rhône) voisin de la mer (1), sur un sol dont nous donnons quelques caractéristiques physiques et chimiques (voir tableau 1).

TABLEAU I

Analyse physique (terre du Mas de Pin Fourcat)	
Sable grossier	0,50
Sable fin	20
Limon	25
Argile	20
Analyse chimique (terre du Mas de Pin Fourcat)	
CO_3Ca ‰	350
Azote total	de 1 à 2,5 ‰ (suivant les traitements des parcelles)
P_5O_2 (BM)	3
K_2O (BM)	30
Carbone % (Anne)	1 %
C/N	de 5 à 10
NaCl	0,5 %
pH	de 7 à 7,6

Nous rappellerons aussi que l'on pratique en Camargue la culture du riz en terres noyées. Les semis ont lieu aux alentours du 1er mai soit en place, soit en pépinières. On effectue le repiquage, s'il y a lieu, un mois plus tard. Les terres sont recouvertes

(1) Nous tenons à remercier ici Mr Marcel COSTE, délégué agronomique de la Société de Saint-Gobain qui a mis à notre disposition toutes facilités au Domaine de Pin Fourcat et nous a ainsi beaucoup aidée tout au long de ce travail.

d'un plan d'eau qui s'écoule lentement et dont l'épaisseur varie plus ou moins suivant le mode d'irrigation, mais s'établit en général à une vingtaine de centimètres au-dessus de la boue. Les conditions générales pour la terre sont donc celles d'un milieu noyé et peu aéré.

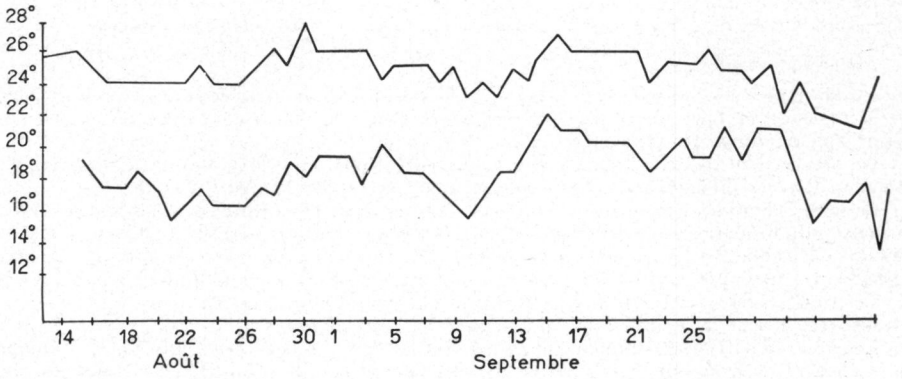
La Camargue, se trouvant en zone méditerranéenne, jouit d'un climat comportant les caractéristiques de cette zone : étés chauds (21°) et lumineux, hivers à moyenne tempérée (7°). Les précipitations comportent un maximum à l'automne et la dessiccation du sol ne se produit donc qu'aux époques où s'installe le mistral, en général au printemps. La mise en eau de la rizière y mettra fin, à l'époque du semis ou du repiquage.

Les tableaux et graphique suivants donnent un certains nombre d'indications sur les conditions climatiques du milieu.

TABLEAU 2

Hauteur des pluies et températures moyennes

	Aigues-Mortes (altitude 2 M) Hauteur des pluies en mm		Température		*Les Saintes-Maries* Hauteur des pluies
	—		—		—
Janvier	45		6,1		53
Février	43		7,4		37
Mars	39		9,7		38
Avril	43		13,5		50
Mai	45		16,9		46
Juin	57		20,4		36
Juillet	16		23,2		13
Août	27		22,7		27
Septembre	39		19,7		56
Octobre	73		15,0		79
Novembre	54		10		67
Décembre	39		6,1		47
Total	520	Total moyen.	14,2	Total	549



GRAPHIQUE 1. — *Rizière du Pin Fourcat — Températures de l'eau de rizière (Maxima et minima)*

II. — ÉTUDE DES DIFFÉRENTS ORGANISMES FIXATEURS

1° Algues fixatrices des rizières

Les algues fixatrices, qui ont été signalées comme très abondantes dans les rizières tropicales, ne sont pas absentes des rizières de Camargue, mais semblent trop dispersées pour jouer un rôle important. Bourrelly (1950) dans sa « florule algologique d'une rizière de Camargue » mentionne *Nostoc* sp. signalée par les auteurs comme une algue fixatrice. Nous-mêmes avons relevé, en plus de ce genre, *Tolypotrix* et diverses *Oscillaria*, mais seulement sporadiquement.

Par contre les *Azotobacter* nous sont apparus comme des bactéries constamment présentes dans tous les essais d'isolement de microorganismes de la rizière.

2° Les azotobacter de la rizière

Nous avons cherché, pour déterminer l'importance de ces microorganismes, à effectuer leur numération dans les boues de Camargue.

Techniques

A. — *Cultures sur la terre moulée et épreuve des grains de terre sur silicogel*

Ces deux techniques dues à Winogradsky manquent de sensibilité lorsqu'il s'agit des numérations d'*Azotobacter* dans les boues de rizières. Les colonies sont confluentes et difficiles à compter. Il faut donc, devant l'abondance des germes, s'adresser à d'autres techniques pour les dénombrer. C'est pourquoi nous avons essayé :

B. — *Numération en milieu liquide*

Technique : on effectue des suspensions-dilutions de terre suivant la méthode décrite par J. Pochon ; il est nécessaire, étant donnée l'abondance des *Azotobacter* dans les boues de rizières, de pousser les dilutions jusqu'à 10^{-8} et même 10^{-9}. On prépare un milieu sélectif liquide sans azote, enrichi en substrat hydrocarboné (la mannite en l'occurence) et en éléments minéraux. Nous avons utilisé la formule indiquée par Augier (1956) et que nous rappellerons ici :

Solution Winogradsky standard 1/20	qs ps 1 000 ml
Carbonate de calcium	0,5 g
Solution oligo-éléments	1 ml
Extrait de terre	10 ml

On répartit ce milieu en tubes 22/22 à raison de 5 ml par tube. On ensemence à partir de chaque suspension-dilution de 1 à 5 tubes de culture avec 1/2 ml de cette suspension dilution.

Lecture des cultures.

Le développement des cultures est rapide et l'on peut faire un premier examen dès le 7e jour. Une seconde lecture faite au 10e jour est quelquefois utile pour décider du caractère positif d'une culture aux dilutions très élevées.

On observe dans ces conditions le développement de plusieurs catégories de germes, qui, tous, au moins dans les premiers jours de la culture, sont des germes fixateurs d'azote.

Ce sont d'abord les *Azotobacter* qui forment dans les tubes ensemencés avec les faibles dilutions les voiles gris brunâtres caractéristiques du développement de ces germes en milieu liquide. La présence de mannite dans le milieu les favorise sans empêcher cependant le développement des *Clostridium*, ceux-ci provoquent une fermentation butyrique dans la masse du liquide, sous le voile.

Les troubles dus aux *Clostridium* s'observent en général jusqu'aux dilutions —3 ou —4 (nous verrons que ce sont là les dilutions limites pour les *Clostridium*).

Les voiles des *Azobacter* diminuent en importance dans l'échelle des dilutions. Ils diminuent non seulement en épaisseur mais aussi en surface pour se réduire à un anneau accroché au bord du tube au niveau du liquide. Un examen microscopique de cet anneau, puis des cultures sur silico-

gel pratiquées à partir de cet anneau ou à partir des écailles flottant sur le liquide révèlent pourtant la présence des *Azobacter*. Voiles, anneaux, écailles, sont donc des caractères de cultures positives qui permettent de déceler la présence d'*Azobacter* jusqu'à des dilutions parfois très élevées, mais les lectures sont souvent délicates : la concurrence des divers germes fixateurs d'azote est certainement un facteur inhibant le développement des *Azobacter*. Mais elle est surtout accentuée aux faibles dilutions pour lesquelles les *Azobacter* sont si nombreux qu'ils ne disparaissent cependant pas de la culture.

Aux dilutions plus poussées leur développement parfois difficile est peut-être l'effet d'une carence. L'inoculum, très faible dans ces derniers tubes apporterait les facteurs de croissance en moindre quantité que dans les premiers tubes de la série, et il est souvent difficile de distinguer un anneau de croissance d'une simple évaporation avec dépôt minéral au bord du tube. Le tube ne doit être marqué positif qu'après contrôle microscopique de la nature du dépôt.

Ces difficultés avaient amené WINOGRADSKY à considérer toute technique de numération en milieu liquide comme « peu sensible » et inutilisable. Nous dirons que dans le cas des numérations d'*Azotobacter* dans les boues de rizières cette méthode bien qu'effectivement peu sensible est cependant la seule praticable.

Résultats

Nous donnons ici deux tableaux (tableaux 3 et 4) donnant quelques-uns des résultats que nous avons obtenus (dernières dilutions à tubes tous positifs) et d'où l'on peut dégager les conclusions suivantes :

TABLEAU 3

*Relevé des numérations d'*Azotobacter *avec l'inondation des terres*

Date de prélèvement	Lieux	Dernière dilution à tubes tous positifs
	Rizière inondée près du Rhône (Sauvage)	— 3
	— non drainée Pâtis de la Trinité	— 2
	— — Albarron	»
27 janvier	— — Sylvereal	»
	— asséchée Capette	»
	— — Sauvage	»
	— — Pin Fourcat	»
28 février	Rizière asséchée près d'Agde	— 2
	Rizière inondée près du Rhône (Sauvage)	— 3
	Rizière non drainée Sylvereal	— 2
1er mars	— — Pin Fourcat (clos I)	— 2
	— asséchée — (clos II)	— 1
	— — Mas du Sauvage	— 1
	Terres de pépinières inondées	— 6
14 avril	— — —	— 7
	Terres de pépinières inondées	
4 mai	3 terres positives à	— 9
	2 terres positives à	— 8

— les *Azotobacter* existent dans les boues de rizières en quantité considérable puisque l'on a pu observer des cultures pour lesquelles tous les tubes ensemencés avec les dilutions 10^{-8} et 10^{-9} étaient encore positifs.

— le nombre de ces *Azotobacter* subit des fluctuations au cours de l'année. On observe un minimum pendant l'assèchement des rizières qui coïncide aussi avec la

TABLEAU 4

Numération des germes fixateurs d'azote en rizière (novembre). Profondeur des prélèvements.

Degré de dilution	Mas du Pin Fourcat					Mas du Merle				
	10 cm	20 cm	30 cm	40 cm	50 cm	10 cm	20 cm	30 cm	40 cm	50 cm
10^{-1}	+++++ +++++	+++++	+++++	+++++	+++++ +++++			+++++ +++++ +++++	+++++ +++++ +++++	+++++ +++++ +++
10^{-2}	+++++	+++++	+++++	+++++	+++++ +++++		+++++ +++++ +++	+++++ +++++ ++	+++++ +++++ +++	+++++ +++++ +++
10^{-3}	+++++	+++++ +	+++++ +	++	+++++	+++++ +++++ +	+++++ +++++ +	+++++ ++++	+++++ ++++	+++++ +++++ ++++
10^{-4}	+++++	++++	+++	+	+++++	+++++ ++++	+++++ +++++	+++++ +++++	+++++ +++++	+++++ +++
10^{-5}	+++++	++++	++	+	+++++	+++++ +	+++++ +++++	+++++ +++++	+++++ +++	+++++
10^{-6}	+++++	+++	++	+++	++	+++++ +	+++++ +	+++++ ++	+++++ +	+++++ ++++
10^{-7}	+++++	++	++	++	++	+++++ +	+++++	+++++ ++	++++	
10^{-8}	+++++	++				+++++	+++++	+++++		
10^{-9}	+++++					+++++ ++				
10^{-10}	+++++					+++++ +				
10^{-11}	+++++									

Nota : La lecture a été faite sur 5 tubes pour chaque suspension dilution. Nous avons totalisé dans ce graphique le nombre de croix appréciant le développement des tubes de cultures pour chaque suspension dilution.

Terre de Pin Fourcat alluvions fluvio-marins.

Terre de la Crau éboulis de plateaux.

saison froide (février-mars). La fin de la saison de végétation correspond au maximum de développement des *Azotobacter* (mois de septembre et d'octobre) ;

— les *Azotobacter* existent non seulement dans la partie superficielle de la rizière mais aussi dans les horizons profonds puisque nous les avons observés jusqu'à 50 cm de profondeur (1).

— nous avons observé des différences importantes entre les populations des rizières établies sur terrains différents (alluvions marins ou terres de plateaux), mais nous n'avons pu apprécier que de très légères différences sur des parcelles voisines ayant reçu des engrais différents.

Discussion

Le phénomène de l'abondance des *Azotobacter* sans être propre aux rizières est favorisé par l'inondation des terres. La diminution de l'oxygène dans les boues au cours de l'été n'amène aucun fléchissement dans la population d'*Azotobacter*, qui descend également en profondeur à des niveaux pauvres en oxygène.

Ces constations semblent en contradiction avec les indications des premiers auteurs qui classaient l'*Azotobacter* parmi les germes « excessivement avides d'oxigène » WINOGRADSKY écrit notamment en énumérant les inconvénients de la méthode de numération en milieu liquide : « Immergé avec des particules de terre sur lesquelles sont fixées ses colonies, il est forcé de commencer son développement noyé sous une couche de liquide plus ou moins épaisse au lieu d'un contact immédiat avec l'air *ce qui lui est normal.* »

Or de nombreux auteurs ont signalé le lien qui existe entre l'humidité et la présence d'*Azotobacter* (DE, DATTA, BIWAS, UPPAL, PATEL, DAJI). D'autre part GENKEL et SILIN en 1946 signalent les *Azotobacter* dans les horizons profonds, GENKELS en 1953 dans les boues lacustres.

Enfin les travaux de TSCHAPEK (1955-1956) sur le métabolisme des *Azotobacter* à différentes pressions d'oxygène montrent que la multiplication de ces germes ainsi que leur rendement énergétique augmente quand la pression d'oxygène diminue. Les rizières offriraient d'après ce dernier auteur des conditions particulièrement favorables à sa multiplication : « celles de sols peu aérés et inondés ».

Il nous reste maintenant à chercher si la multiplication des *Azotobacter* dans ce milieu s'accompagne de fixation d'azote.

C'est ce que nous avons essayé de mesurer dans la seconde partie de ce travail.

Nous signalerons auparavant brièvement, quels sont les autres germes fixateurs d'azote dans la rizière et en premier lieu les *Clostridium* qui sont toujours intimement associés aux *Azotobacter*.

3° NUMÉRATION DES CLOSTRIDIUM

Technique

Nous avons vu en effet que les *Clostridium* sont toujours présents dans les sols des rizières dans lesquels nous avons décelé les *Azotobacter* et nous avons cherché à évaluer l'importance relative de ces germes. Dans ce but nous avons effectué une numération des *Clostridium* en utilisant une technique simple (J. POCHON, Cours de microbiologie du sol, Institut PASTEUR).

(1) Nous remercions M. LOUVET, chargé de Recherches au Centre national de Recherches agronomiques à Versailles pour nous avoir facilité les prélèvements en profondeur grâce à sa coopération personnelle et au prêt de matériel de sondage.

La mannite élément préférentiel des *Azotobacter* est remplacée dans le milieu liquide par le glucose, plus favorable aux *Clostridium*. Le milieu de culture est réparti en tubes étroits (16/16) bouchés d'une capsule de caoutchouc. On immerge dans le liquide une petite cloche de verre renversée (8 mm de diamètre / 50 à 60 de longueur) et après stérilisation, on ensemence ces tubes avec les suspensions dilutions de terre.

Dans ces conditions, nous n'observons plus de voiles d'*Azotobacter* même aux faibles dilutions. Le milieu de culture devient trouble à réaction acide avec forte odeur butyrique et dégagement gazeux. La hauteur de ce gaz recueillie dans la petite cloche de verre peut servir à apprécier la richesse du milieu en germes.

Résultats et discussions

L'observation des chiffres relevés au cours de l'année, montre que les *Clostridium* sont en moins grand nombre, dans les rizières, que les *Azotobacter*.

D'autre part, les petites fluctuations observées d'un prélèvement à un autre ne sont pas dues à des causes saisonnières.

Dans l'état actuel de nos connaissances il est fort difficile d'apprécier le rôle respectif de ces deux groupes. Il n'est pas impossible que ces groupes exercent les uns sur les autres des effets synergiques.

Les autres germes fixateurs (champignons et notamment levures) dont le rôle est sans doute minime s'ils sont envisagés seuls, peuvent contribuer associés à d'autres germes, à expliquer les chiffres parfois élevés de nos mesures de fixation d'azote.

III. — ESSAI D'APPRÉCIATION DU POUVOIR FIXATEUR DES BOUES DE RIZIÈRES

On a souvent essayé de mesurer l'activité fixatrice des terres. Plusieurs modalités ont été tentées pour arriver à ce but depuis l'expérience classique de BERTHELOT (Numération d'*Azotobacter*, appréciation de la rapidité de désintégration d'un substrat hydrocarboné dans le sol — mesure de l'enrichissement d'un sol en azote après incorporation d'un substrat hydrocarboné, etc.).

TECHNIQUE DE LA MESURE DU POUVOIR FIXATEUR DES BOUES DE RIZIÈRES

Nous avons mesuré l'enrichissement en azote des boues de rizières de la façon suivante : n'ayant aucune indication à priori sur l'activité de la flore fixatrice dans le milieu naturel nous avons pensé que le phénomène ne serait mesurable que si nous le stimulions par l'addition d'un substrat hydrocarboné et nous avons en premier lieu opéré de la façon suivante :

1 g de boue était déposé dans un Erlenmeyer au contact d'un voulme déterminé de milieu de culture liquide par *Azotobacter* (200 ml d'un milieu semblable à celui utilisé pour la numération). On dose l'azote total au début et en fin d'expérience par la méthode de KJELDAHL après réduction des composés nitriques par le thiosulfate (DEMOLON et LEROUX). Dans ces conditions nous avons obtenu pour des échantillons de terres prélevées en mai et juin, des élévations de richesse en azote de 0,55 à 0,86 mg par flacon (voir tableau 5).

TABLEAU 5

Appréciation du pouvoir fixateur des boues de rizières en un milieu minéral enrichi d'un substrat hydrocarboné (milieu Tchan)

Durée de l'expérience	N total en début d'expérience	N total en fin d'expérience	Gain d'azote en mg par g terre sèche
—	—	—	—
26 mai/26 juin	2,69	3,55	0,86
14 juin/20 juillet	2,28	2,89	0,55

Nous avons pensé que puisque cette fixation était relativement importante il nous serait peut-être possible de la mesurer dans son milieu naturel (eau et boue de rizière), sans aucune addition de substrat.

Les mesures ont été faites dans les mêmes conditions que précédemment (1 g de boue en présence de 200 ml d'eau de rizière — Dosage au début et en fin d'expérience par la méthode de KJELDAHL après réduction des nitrates). Nous avons exprimé le gain ou la perte d'azote en rapportant à 1 g de terre sèche.

Cette façon de faire n'est pas entièrement satisfaisante car la fixation dépend aussi de la qualité et du volume de l'eau introduite. Mais étant donné que cette eau contient peu d'azote et de carbone combinés (1), nous avons pensé que malgré son imperfection, ce mode d'expression était le meilleur à condition toutefois de se placer toujours dans les mêmes conditions de volume (200 ml).

Nous pouvons ainsi en rapportant toujours à 1 g de terre sèche, rendre les résulats des mesures comparables entre eux.

L'expérience rapportée dans le tableau 6, indique les gains d'azote enregistrés sur des boues provenant de 3 parcelles différentes.

TABLEAU 6

Appréciation du pouvoir fixateur des boues de rizières en présence d'eau de rizières, sans addition d'aucun substrat

	N total en début d'expérience	N total en fin d'expérience	Gain d'azote mg par g terre sèche
	—	—	—
Parcelle I	1,40	3,26	1,86
Parcelle II	1,03	2,76	1,70
Parcelle III	1,63	2,65	1,02

Ces trois parcelles diffèrent par les doses d'engrais reçues.

Parcelle I : superphosphate 833 kg à l'ha.
Parcelle II : superphosphate 833 kg à l'ha + 5 kg de molybdate de sodium.
Parcelle III : superphosphate 833 kg à l'ha + 600 kg sulfate d'ammoniaque.

RECHERCHES DES FACTEURS POUVANT EXERCER UNE INFLUENCE SUR LA FIXATION D'AZOTE DANS LES RIZIÈRES

Ce mode de mesure du pouvoir fixateur des boues de rizière nous apparaît donc assez sensible pour permettre d'étudier les variations du pouvoir fixateur sous l'influence de divers facteurs.

Variations saisonnières,

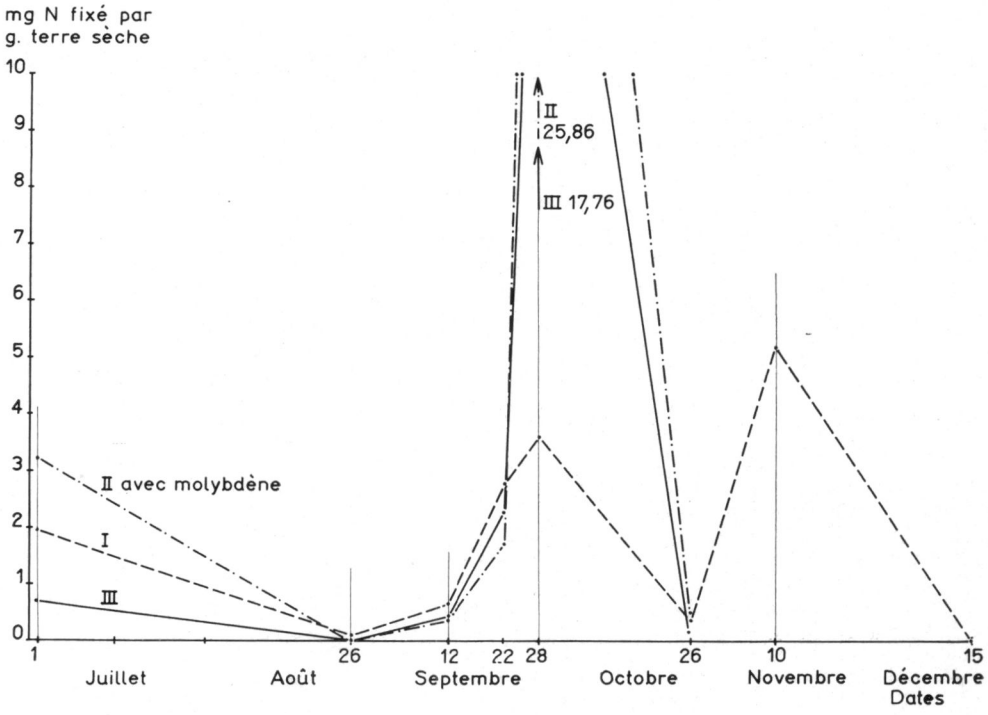
Nous donnons, dans le graphique 2, les valeurs relevées au cours de l'année pour 3 parcelles voisines.

Le phénomène évolue dans le même sens pour les trois parcelles, bien que de légères différences puissent s'observer à un moment donné entre deux d'entre elles.

On peut dire, dans l'ensemble, que le maximum de fixation est observé en fin de végétation au moment de la moisson et dans les jours humides de l'automne sans que nous sachions dès maintenant s'il s'agit là d'une action purement saisonnière ou si,

(1) L'eau de rizière ne contient en général pas de quantités d'azote et de carbone appréciables par nos méthode d'analyse.
Lorsque nous en avons décelées dans certains de nos échantillons d'eau (cas de l'eau stagnante) nous en avons tenu compte en considérant que la boue était enrichie d'autant en carbone et en azote.

comme l'ont suggéré certains auteurs, la plante n'intervenait pas à certains moments par un effet inhibiteur sur les *Azotobacter* (pouvoir fixateur minimum au moment de l'épiaison au mois d'août.



GRAPHIQUE 2 — *Variation du pouvoir fixateur des boues de rizières.*

Influence de différents facteurs physiques et chimiques sur la fixation

1° *Influence de la lumière sur la fixation.*

Nous avons utilisé la même technique de mesure pour déterminer le rôle des algues dans la fixation d'azote moléculaire par les boues.

Nous avons fait les mesures sur des échantillons prélevés dans les mêmes parcelles que précédemment. Pour chaque échantillon on ensemençait 2 séries de 3 flacons chacune, la première série était maintenue à la lumière du jour du laboratoire et la seconde à l'obscurité (flacons revêtus de papier noir et maintenus dans une pièce obscure). Le résultat des mesures indiquées dans le tableau 7, indique qu'il n'y a pas de présomption en faveur d'une action de la lumière. Les cyanophycées n'ont qu'un rôle secondaire dans l'économie de l'azote en Camargue.

L'expérience n'est pas significative ($0{,}70 < P < 0{,}60$). La lumière ne favorise pas la fixation de l'azote qui ne peut donc être imputée ni à des algues, ni à des bactéries à activité photochimique. Cette conclusion n'est vraie que pour un laps de temps court, il existe naturellement une relation indirecte entre algues et fixation d'azote dans les rizières, les algues fournissant une part importante de carbone combiné. *Azotobacter* et *Euglena* semblent en particulier agir synergiquement.

TABLEAU 7

Effet de la lumière sur la fixation d'azote dans les boues de rizières, en Camargue

(1 g de boue + 150 ml eau de rizière)
Durée de l'expérience : 1 mois.

	Obscurité	Lumière
	—	—
Gain d'azote par g de terre sèche	0,630	0,640
	0,390	0,780
	0,830	0,510
	0,390	0,060
	0,510	0,360
	0,410	0,370
	0,430	0,550
	0,430	0,020
	0,600	

2° *Influence du molybdène*

L'élément qui joue un rôle fondamental dans la fixation de l'azote moléculaire est le molybdène. Or la littérature scientifique nous donne peu de renseignements sur l'action du molybdène dans la fixation d'azote par les microorganismes des rizières

Un travail de MALAVOLTA datant de 1954 étudie l'interaction molybdène-azote sur la production de cultures de riz en pots. Mais l'action observée est sans doute attribuable au métabolisme azoté de la plante supérieure ; l'autre part le travail a été effectué sur des cultures en pots, donc dans des conditions qui sont différentes de la rizière.

Notre but a donc été de mesurer l'action du molybdène sur la fixation de l'azote moléculaire par les boues de rizières en travaillant autant que faire se peut sur du matériel soumis à des conditions naturelles.

Nous avons opéré de deux façons :

— Nous avons procédé dans une rizière à un épandage de mobyldate de sodium et nous avons étudié le pouvoir fixateur des boues de cette parcelle en la comparant à celui d'une parcelle témoin.

— Nous avons étudié au laboratoire l'effet du molybdène sur un mélange eau et boue de rizière prélevé préalablement dans une parcelle qui n'avait pas reçu d'apport de cet élément.

Nous donnons quelques résultats des mesures dans le tableau 8.

TABLEAU 8

Influence du molybdène sur le pouvoir fixateur des boues

a) *Épandage en rizière*

Gain d'azote (mg N fixé par g terre sèche)	
Terre I	Terre II
—	—
10,20 mg	42,54 mg
10,80 mg	36,50 mg

Durée de l'expérience : 28/9/61-29/10/61.

Terre I (pas d'engrais azoté — pas de molybdate de sodium — 833 kg superphosphate à l'ha).
Terre II (pas d'engrais azoté — 5 kg molybdate de sodium — 833 kg superphosphate à l'ha).

b) *Expérience au laboratoire*

	Gain d'azote
Témoin sans molybdène	5,22
avec 0,2 γg molybdate de sodium par flacon	5,70
0,4	5,99
0,8	4,54
1,6	4,54
3,2	3,65
6,4	3,18
12,8	3,27
25,6	2,91

Durée de l'expérience : 13/11/61-15/12/61.

Les essais précédents ont été faits sur une échelle encore trop réduite pour constituer un résultat définitif.

Ils indiquent pourtant sous certaines conditions de concentration, un effet en faveur du molybdène, suivi d'un effet déprimant lorsque cet élément atteint des concentrations élevées.

Il nous reste à préciser dans cet effet, des essais ultérieurs, en étudiant en particulier si les apports supplémentaires d'azote sous forme nitrique et ammoniacale ont un effet sur l'importance de la fixation, comme semblerait le prouver le travail de MALAVOLTA.

3° *Influence du lieu de prélèvement*

Les prélèvements faits dans les pâturages naturels avoisinants les rizières (sansouïres) ont toujours donné des chiffres bien inférieurs à ceux relevés sur les boues de rizières à la fois pour les numérations d'*Azotobacter* et pour les gains d'azote (voir tableau 9).

TABLEAU 9

Évaluation du pouvoir fixateur de différentes terres

(prélèvement du 4 janvier 1962)

	mg N fixé par g de terre sèche
Rizière du Merle :	
(éboulis caillouteux des terrasses)	2,614
Rizière de Montmajour :	
(alluvions de vallée)	1,868
Pâturage naturel (sansouire) :	
(alluvions fluvio-marins)	— 0,611

(1 g de terre-200 ml eau de rizière, durée de l'expérience : 1 mois).

4° *Influence de la compétition entre les différents groupes de microorganismes*

Le gain d'azote que nous mesurons (mg d'azote par g de terre sèche) n'est en réalité que la résultante des compétitions entre différents groupes de microorganismes. Or les conditions dans lesquelles nous travaillons, sans addition de substrat d'aucune sorte, sont celles d'un milieu pauvre qui ne sont pas très favorables aux développements bactériens.

Nous accroîtrons les possibilités de développement de ces germes si nous réduisons le nombre de bactéries en compétition en stérilisant par exemple l'eau de rizière dans laquelle nous déposons la boue.

C'est ce que montre le tableau 10.

TABLEAU 10

	Eau de rizière stérilisée	Eau non stérilisée
	—	—
	mg	mg
Gain d'azote par g de terre sèche	10,80	0,71
	10,20	6,44
	42,54	12,40
	36,50	12,00
	28,26	3,99
	28,09	10,70

(Expérience significative au seuil de probabilité P = 0,01).

Si nous ajoutons au contraire un substrat minéral azoté tel que le nitrate de soude, cet apport va favoriser la microflore dénitrifiante qui, en l'espace de quelques jours, utilise le carbone organique du milieu. La dénitrification, et la perte d'azote qui en est la conséquence, s'arrêtent lorsque le carbone atteint une valeur limite qui ne peut plus permettre le développement de ces groupes bactériens (tableaux 11 et 12).

TABLEAU 11

Perte d'azote par addition d'azote minéral à une boue de rizière (expérience au laboratoire)

	Pas d'addition d'azote N fixé (en mg/g terre sèche)	NO_3 (0,1 g par flacon) Perte N gazeux	NH_4 (0,08 g par flacon) Perte N gazeux (en mg/g terre sèche)
Pas d'addition de molybdène	+ 5,22	— 8,06	— 7,74
0,2 μg molybdène par g de boue.	+ 5,70	— 8,81	— 7
0,4 μg de molybdène par g boue.	+ 5,99	— 10,42	— 7
0,8 μg molybdène par g de boue.	+ 4,54	— 9,98	— 7,7

Nous enregistrons une perte d'azote atteignant 50 p. 100 de l'apport primitif. Dans ces conditions l'effet du molybdène est nul ou masqué (tableau 11). Cette mesure est bien en accord avec le résultat signalé depuis longtemps sur l'inhibition des *Azotobacter* par les engrais azotés.

Les mesures effectuées sur des rizières après épandage de sels ammoniacaux ont montré des différences significatives entre les pouvoirs fixateurs des échantillons prélevés sur parcelle à sulfate d'ammoniaque et ceux des échantillons provenant de parcelles témoin sans engrais. Cet effet s'atténue pourtant très rapidement et, en fin de végétation, nos mesures ne nous permettent pas de déceler de différences entre les pouvoirs fixateurs des rizières ayant reçu différents traitements (tableau 12). Il est intéressant de connaître d'autre part, l'activité des microflores ammonifiantes.

Il semble à priori qu'elle puisse être élevée dans ce milieu que l'on dépeint comme réducteur. Y a t-il perte en rizière sous forme d'ammoniac ? L'activité de la micrcflore ammonifiante pourrait expliquer en partie les différences relevées entre les bilans d'azote.

TABLEAU 12

Action de l'épandage de printemps d'engrais ammoniacaux sur le pouvoir fixateur des boues de rizière

Pouvoir fixateur en été

(1 g de boue + 200 ml eau de rizière. Prélèvement du 29/6/61. *Durée de l'expérience* : 1 mois).

	mg N fixé par g terre sèche	Moyenne arithmétique
	—	—
Parcelle I sans engrais azoté	2,32	
	2,79	1,92
	0,66	
Parcelle II sans engrais azoté	1,97	
	2,40	1,7
	0,73	
Parcelle III avec engrais ammoniacal	0,87	
	1,37	0,69
	0,83	

Pouvoir fixateur à l'automne

(1 g de boue + 200 ml eau de rizière. Prélèvement du 29/9/61).

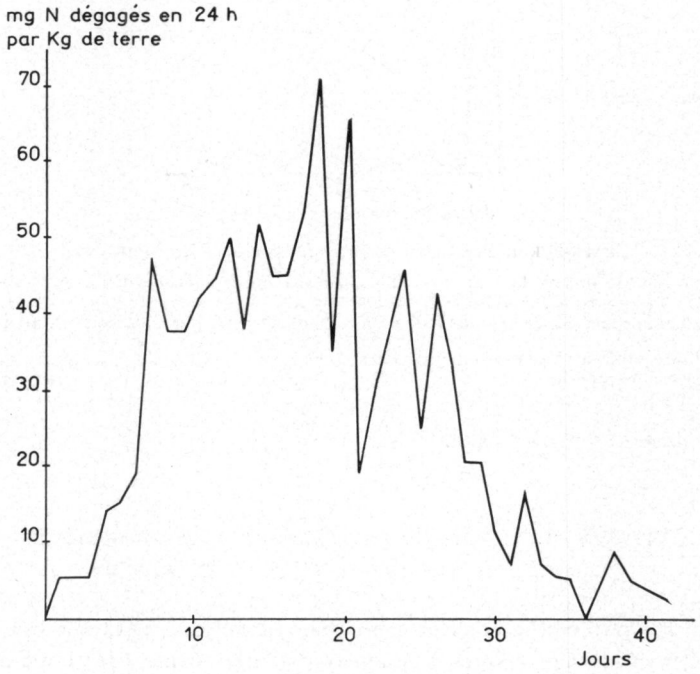
Parcelle I	2,83	
	2,76	2,74
	1,14	
	2,83	
Parcelle II	2,53	
	1,43	
	1,44	1,71
	1,44	
Parcelle III	1,86	
	2,12	2,27
	2,80	
	1,30	

Nous avons utilisé pour la mesure de ce dégagement d'ammoniac, la technique de la plaque de terre de POCHON et TCHAN mais sans incorporer aucun élément étranger à la terre.

Nous rappelons que dans cette technique un échantillon de terre (100 g) est placé en boîte de Pétri de 9 cm de diamètre avec un degré d'humidité correspondant à celui de son milieu naturel (environ 45 p. 100 d'eau pour les boues de rizière). Cette boîte sans couvercle est placée dans un récipient clos (une boîte de Pétri de 22 cm de diamètre par exemple) dans laquelle on a versé un quantité connue d'acide faible (acide sulfurique N/50) additionné d'un indicateur coloré. On mesure tous les jours la quantité d'ammoniac fixé par un titrage en retour.

Nous avons étudié ainsi les échantillons de boues provenant de différentes parcelles prélevées à différentes moments de la saison. Nous avons observé un dégagement important d'ammoniac dans un seul cas, celui d'une pépinière qui, au printemps, avait reçu des doses massives de sulfate d'ammoniaque pour forcer la végétation.

Nous nous rapprochons dans ce cas de l'expérience de laboratoire que nous avons rapportée plus haut. Les flores nitrifiantes et ammonificatrices sont stimulées par l'apport d'une quantité massive d'azote. On observe un dégagement d'ammoniac pendant quelques semaines. Le bilan s'établit pourtant en faveur des *Azotobacter*. Le gain d'azote au bout d'un mois est de 0,75 mg. (Graphique 3).



GRAPHIQUE 3. *Dégagement d'ammoniac par les boues de rizière*

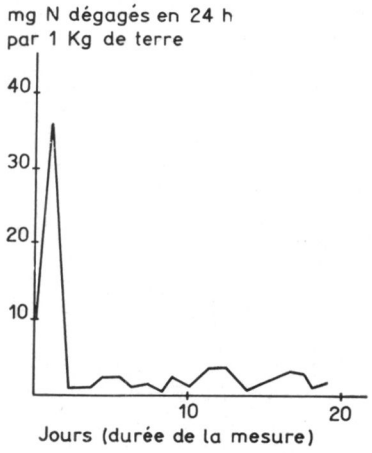
Échantillon de terre prélevé le 18 Mai en terre de pépinière ayant reçu une dose élevée d'azte (900 kg sulfate d'ammoniaque à l'ha)
Dosage de l'ammoniac dégagé par 100 g de terre en boîte de Pétri à 28°
Durée de l'expérience : 45 jours.

Azote total au départ pour 1 g terre sèche	2,5 mg
en fin d'expérience	3,25 mg
Gain d'azote	0,75 mg

Le bilan d'azote est positif malgré le dégagement d'ammoniac.

Nous avons mesuré sur les autres échantillons prélevés en rizières, des dégagements insignifiants d'ammoniac, exceptions faites pour les deux ou trois jours qui suivent le prélèvement où, pour un temps bref, les flores ammonifiantes (champignons en particulier) semblent favorisées (graphique 4).

Il ressort donc que dans les conditions de la rizière, au cours des compétitions qui s'établissent entre les différentes flores, la microflore fixatrice est favorisée et sort en général gagnante.



GRAPHIQUE 4. *Dégagement d'ammoniac par les boues de rizières*

Échantillon de terre prélevé le 6 juin, en rizière sur parcelle à fumure suivante : apport d'azote nul, superphosphate : 833 kg à l'ha, molybdate de sodium : 5 kg.
Dosage de l'ammoniac dégagé par 100 g de terre en boîte de Pétri à 28°. Durée de l'expérience : 20 jours.

Azote total au départ par 1 g de terre sèche	0,973 mg
en fin d'éxpérience.....	4,26 mg
Gain d'azote	3,52 mg

Le bilan d'azote est fortement positif.

VITESSE DU PROCESSUS DE FIXATION BACTÉRIOLOGIQUE. IMPORTANCE DE CETTE FIXATION EN RIZIÈRE

Il serait souhaitable de pouvoir connaître la cinétique de la réaction de fixation pour connaître en dernier ressort la quantité d'azote fournie à la plante par la microflore fixatrice. C'est ce qui nous a conduit à l'expérience suivante dans laquelle les mesures ont été faites de trois jours en trois jours sur deux séries comportant chacune 10 flacons. Le protocole expérimental est le même que pour les expériences précédentes (1 g de boue — 200 ml eau de rizière) (graphique 5).

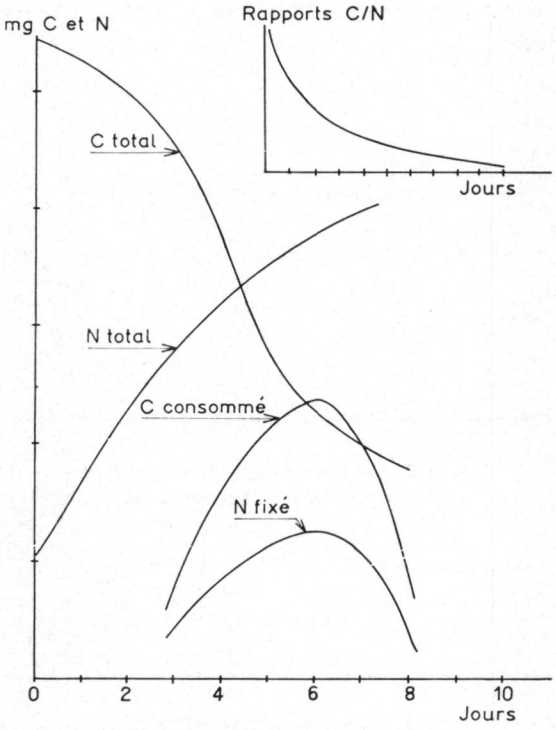
Ce graphique nous montre que :

1° La courbe représentant les quantités d'azote fixé journellement en fonction du temps, présente les caractères d'une courbe en cloche dont le sommet est rapidement atteint (au bout de 6 jours dans notre expérience). L'épuisement du carbone arrête automatiquement cette fixation.

2° Le rapport de fixation est élevé, le rapport C/N étant lui-même très bas. Or *Azotobacter* et *Clostridium* ont chacun séparément un rendement de fixation considéré comme peu économique. Tout se passe comme si le rendement de fixation élevé que nous observons était l'effet d'une synergie entre les différents groupes bactériens.

On ne peut transposer ces conclusions à la rizière. Tout porte à croire qu'en milieu naturel il n'y a jamais arrêt complet des processus de fixation puisque le renouvellement du substrat hydrocarboné est assuré par l'activité des flores cellulolytiques et, hemicellulolytiques de même que par les excrétions des plantes supérieures. Si l'on

continue d'ailleurs les dosages d'azote dans les flacons en observation, les chiffres des mesures ne sont pas constants ; il existe certainement des alternances de cycles évoluant plus ou moins rapidement.



GRAPHIQUE 5 — *Terre du Merle*

Ces alternances sont reflétées dans les estimations périodiques des richesses du sol en azote total (graphique 6) ou en azote nitrique et ammoniacal (F. HUGUET).

Les variations dans les réserves azotése du sol ne peuvent pas s'expliquer entièrement par l'apport des engrais azotés d'une part, d'autre part en calculant l'exportation d'azote par les résoltes, les drainages et les pertes d'azote gazeux. L'on sait que dans les conditions climatiques du midi de la France, une rizière est capable de porter en année normale, une récolte de riz d'une trentaine de quintaux sans avoir jamais reçu d'engrais azoté (F. HUGUET). L'étude des facteurs susceptibles d'améliorer cet enrichissement naturel se confond avec celle des conditions régissant le développement de la flore fixatrice bactérienne.

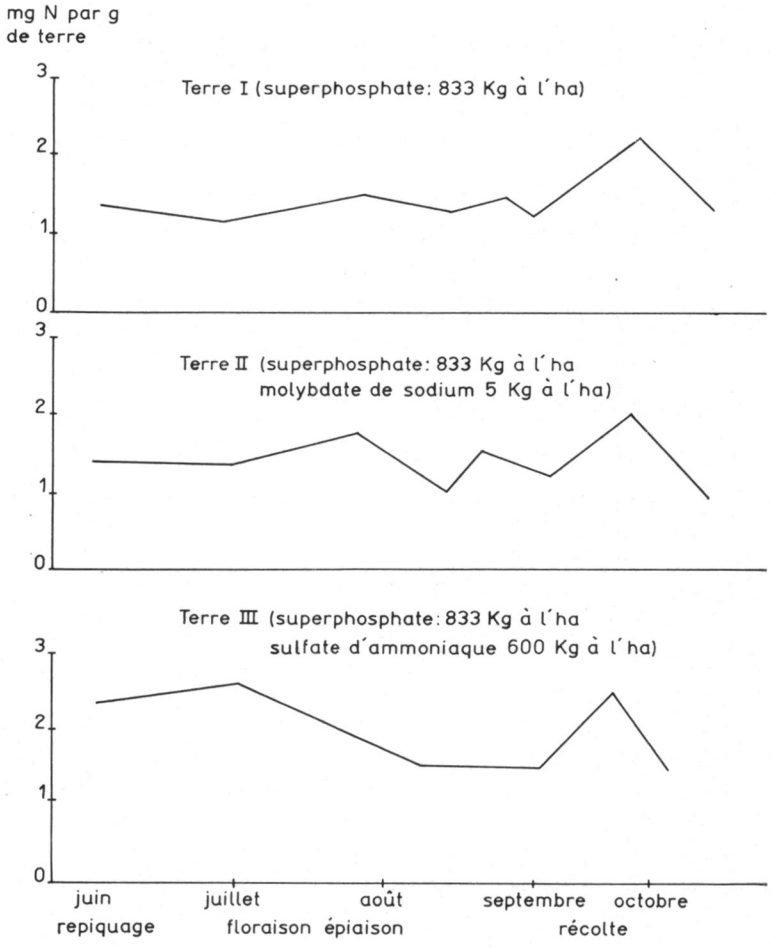
INFLUENCE DE LA SUBMERSION

Les expériences précédentes sont trop peu nombreuses et les conditions dans lesquelles nous nous sommes placée trop éloignées de celles de la rizière pour qu'il nous soit permis d'énoncer des conclusions applicables à l'agronomie.

Il semble pourtant que l'on puisse de nos observations déduire le fait suivant :

La fixation d'azote gazeux par les microorganismes est plus élevée en terre noyée qu'en terre simplement humide.

Cette conclusions qui nous était suggérée par l'étude des variations dans les populations d'*Azotobacter* au cours des différentes saisons de l'année est confirmée par l'expérience suivante.



GRAPHIQUE 6

Nous avons prélevé le même jour des échantillons de boue dans 2 terres de rizières.

Ces échantillons ont été homogénéisés, l'humidité et la teneur en azote totale ont été déterminées, puis chacun d'eux a été utilisé de la façon suivante : Une première série de 3 flacons recevait, dans chaque flacon, 200 g de terre sans aucun autre apport d'eau ni de substrat ; Une deuxième série de 3 flacons recevait, 1 g de boue et 200 ml d'eau.

Les résultats des mesures de fixation ont été les suivants (voir tableau 13).

TABLEAU 13

Expérience de fixation du 13/2/62 au 26/2/62

	Terres humides (200 g terre)		Terres noyées (1 g terre-200 ml eau)	
H	5 à 6 % humidité	15 à 17 % humidité		
Lieu des prélèvements	Le Merle	Montmajour	Le Merle	Montmajour
	0,53	1,25	2,02	3,22
	0,89	1,06	1,76	1,62
	0,12	0,79	1,33	1,96

Cette expérience est significativement en faveur de la submersion. Elle mesure un résultat global qui exprime l'activité de tous les microorganismes sans qu'il soit possible de discerner le rôle respectif des *Azotobacter* et des *Clostridium*, à qui certains auteurs attribuent un rôle primordial en terre inondée (DE et DATTA BISWAS).

Ces auteurs arrivent d'ailleurs par des expériences dont les protocoles ont une certaine analogie avec les nôtres à des conclusions semblables : lorsque le degré d'humidité des terres descend aux environs de 15 p. 100 (humidité moyenne des rizières après assèchement), la fixation d'azote est presque nulle « en dépit du fait que les conditions sont des conditions d'aérobiose et qu'elles sont donc plus favorables à l'*Azotobacter* ».

Les travaux de RICHARDS (1917), OLSEN (1932) et JENSEN aboutissent aux mêmes conclusions. Ce dernier explique le fait par la disparition des bactéries cellulolytiques anaérobies, au moment de l'assèchement des rizières ; or, ces bactéries cellulolytiques seraient les générateurs d'acides organiques libres qu'utilisent les *Azotobacter*.

La fixation d'azote semble donc plus importante dans les rizières inondées que dans les sols asséchés de ces mêmes rizières où règnent des conditions d'aréobiose [1].

IV. — CONCLUSIONS

Il se dégage donc de l'étude qui précède les conclusions suivantes :

Le milieu noyé et mal aéré de la rizière est très favorable à la multiplication des *Azotobacter*, ainsi qu'au phénomène de fixation de l'azote gazeux.

Les microorganismes y subissent des fluctuations saisonnières numériques qui s'accompagnent de variations dans le pouvoir fixateur de la terre. Le minimum de leur développement correspond à la période d'assèchement tandis qu'ils sont très abondants en fin de végétation, tant que la rizière reste inondée.

L'emploi des engrais azotés produit également un fléchissement dans la population d'*Azotobacter*, peu durable d'ailleurs, et favorise les flores dénitrifiantes et ammonificatrices.

[1] Nous désirons tout spécialement remercier ici Mr le professeur J. POCHON qui nous a facilité l'exécution de ce travail aussi bien par son enseignement à l'Institut Pasteur que par ses conseils bienveillants.

L'emploi des sels de molybdène favorise la fixation d'azote dans certains cas, et dans des conditions que nous n'avons pas encore précisées.

On peut espérer qu'en agissant sur cet élément ou encore par d'autres moyens culturaux (par exemple submersion prolongée), le riziculteur arrive à une action positive sur les phénomènes de fixation d'azote gazeux et à une meilleure économie du bilan de l'azote.

Reçu pour publication en avril 1962.

SUMMARY

NITROGEN FIXATION IN THE RICE FIELDS OF CAMARGUE

The nature of the nitrogen-fixing organisms in the rice-lands of southern France is investigated.

Under those particular conditions, cyanophycees do not seem to be of much importance, where *Azotobacter* are always very numerous as long as the soil is water-logged, in the deeper part of the ground (50 cm) as well as in the upper parts. *Clostridium* form also an important part of the fixing organisms.

The author describes the technics used to cultivate them and estimate their number.

A simple method fitted to measure the nitrogen fixing capacity of the paddy soils is described too.

Influences of several factors (temperature, flooding, use of fertilisers and micronutrient as molybdenum) are investigated by the use of this method.

It is hoped that a full knowledge of the biology of *Azotobacetr*, a better control of flooding and the use of some micronutrients as molybdenum, could lead to an improvement in nitrogen economy.

ZUSAMMENFASSUNG

Das Ziel dieser Arbeit ist die Bestimmungder stickstoffestlegenden Organismen in den Reisfeldern der Camargue. Es ergibt sich, dass unter diesen Böden und Klimaverhältnissen, die *Azotobacter* die wichtigsten sind.

Die zu ihrer Zählung angewandten Methoden werden beschrieben, sowie diejenigen, die zur Bestimmung der Festlegungskapazität der Schlämme benützt wurden.

Die Menge der vorhandenen *Azotobacter*, sowie die Festlegungs-kapazität der Schläme sind Schwankungen unterworfen, die Zeit-(Bodenbewässerung und Temperatur) oder bodenbedingt sind (physikalische Eigenschaften oder Verabreichung von Elementen wie z. B. Molybdän).

Es scheint, dass eine Verbesserung der Festlegungskapazität der *Azotobacter* möglich ist, durch Einwirkung auf die Bodeneigenschaften.

О феномене закрепления азота рисовыми плантациями Камарга.

Тереза РУКЕРОЛЬ (Монпелье).

Целью данной работы являлось определение азото-закрепляющих организмов рисовых плантаций Камарга.

Было определено что в условиях почв и климата этого района наибольшую активность в этом отношении проявили бактерии типа *Azotobacter* и *Clostridium*.

Автор описывает технические приемы примененные для исчисления, бактерий и для оценки емкости закрепленного грязями плантации азота.

Плотность бактерийного населения также как и емкость закрепления подверженны флюктуациям зависящим от сезонной температуры и от состояния самой почвы (почва залитая водой, почва к которой были прибавлены определенные элементы как, например, молибден).

Автор приходит к заключению что можно надеяться добиться улучшения процесса закрепления азота оказывая действие на эти два фактора.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ALLISON F. E., MORRIS H. J., 1930. Nitrogen fixation by blue green algae. *Science*, **71**, 221-223.

AUGIER J., 1956. A propos de la numération des *Azotobacter* en milieu liquide. *Ann. Inst. Pasteur*, **91**, 759-765.

AUGIER J., 1957. A propos de la fixation biologique de l'azote atmosphérique et de la numération des *Clostridium* fixateurs dans les sols. *Ann. Inst. Pasteur*, **92**, 817-824.

BOURRELY P., MANGUIN E., 1950. Florule algologique d'une rizière de Camargue. *La Terre et la Vie*, **5**, 286-295.

CHAUDHURI H., 1940. Nitrogen fixation in the rice-field soils of Bengal. *Nature*, **145**, 936-937.

DE P. K., 1936. The problem of the nitrogen supply of rice. Fixation of nitrogen in rice under water logged conditions. *Indian J. Agric. Ssci.*, **6**, 1237-1245.

DE P. K., PAIN A. K., 1936. A biochemical study of the paddy soils of Bengal with special reference to their nitrogen-fixing capacities. *Indian J. Agric. Sci.*, **6**, 746-755.

DE P. K., BOSE N. M., 938. A study of the microbiological conditions existing in rice soils. *Indian J. Agric. Sci.*, **8**, 487-498.

DE P. K., 1939. The role of blue-green algae in nitrogen fixation in the rice field. *Proc. Roy. Soc. (London)*, *B* **127**, 121-139.

DE P. K., DATTA BISWAS N. R., 1952. Fixation of nitrogen in rice soils in the dry period. *Indian J. Agric. Sci.*, **22**, 375-388.

DEMOLON A., LEROUX D., 1933. Guide pour l'étude expérimentale du sol. *Gauthier-Villars*, Paris.

DILWORTH M. J., PARKER C. A., 1961. Oxygen inhibition of respiration in *Azotobacter*. *Nature*, **191**, 520-521.

GENKEL P., SILIN, 1946. Présence d'*Azotobacter* dans les horizons profonds. *Pedology*, **11**.

GENKEL P., 1953. Présence d'*Azotobacter* dans le fond des lacs. *Trans. Congr. Soil Microbiol., Moscow.*

GUEDES O. J., 1956. Diffusion of *Azotobacter* in cultivated soils. *Congr. Sci. Sol*, **3**, 189.

HARADA T., 1954. Studies on the blue-green algae in Japan. *Int. Rice Comm. Newsletter*, **10**, 18-20.

HUGUET F., 1958. Aspects actuels de la nutrition du riz. *Bull. Rizicult. France*, **57**.

HUGUET F., 1960. Insuffisances ou déséquilibres des éléments majeurs dans l'alimentation du riz. *Journ. Riz*, D. S. A.

HUGUET F. Production des rizières ne recevant pas d'engrais. (*Commun. orale*).

JENSEN H. L., 1948. The influence of molybdenum calcium and agar on nitrogen fixation by *Az. indicum*. *Proc. Linnean Soc. NS Wales*, **72**, 299-310.

LANDER P. E., MADHOK M. R., 1940. On the index of nitrogen level in soils. *Indian J. Agric. Sci.*, **10**, 773-775.

MALAVOLTA E., 1954. Studies on the nitrogenous nutrition of rice. *Plant Physiol.*, **29**, 98-99.

OLSEN C., 1929. Nitrogen fixation in the dead leaves from forest beds. *C. R. lab. Carlsberg*, **19**, 9.

OLSEN C., 1929. On the analytical determination of ammonia in soils and the absorption power of soil for ammonia. *C. R. Lab. Carlsberg*, **17**, 15.

OKUDA A., YAMAGUCHI M., 1956. Nitrogen-fixing microorganisms in paddy soils. Part 2 : Distribution of blue-green algae in paddy soils and the relationship between the growth of them and soils properties. *Soil et Plant Food*, **2**, 1.

OKUDA A., YAMAGUCHI M., 1956. Distribution of nitrogen-fixing microorganisms in paddy soils in Japan. *VIe Congr. Sci. sol*, **3**, 521.

PARKER C. A., SCUTT P. B., 1959. The effect of oxygen on nitrogen fixation by *Azotobacter*. *Biochim. Biophys. Acta.*, **38**, 230-238.

POCHON J., TCHAN Y. T., 1946. Association cytophaga et *Azotobacter*. *Ann. Inst. Pasteur.*, **72**, 824.

POCHON J., TCHAN Y. T., 1947. Les acides organiques fixes et volatils constituent-ils un substrat hydrocarboné utilisable par l'*Azotobacter*. *Ann. Inst. Pasteur.*, **73**, 37.

POCHON J., 1954. Manuel technique d'analyse microbiologique du sol. *Masson, Paris.*

POCHON J., AUGIER J., 1954. *Azotobacter* et produits de dégradation des hemicelluloses *Ve Congr. Sci. Sol. Léopoldville.*

POCHON J., de BARJAC, 1958. Traité de microbiologie des sols. *Dunod, Paris.*

POCHON J. Cours de microbiologie du sol. *Institut Pasteur, Trav. prat.*

RICHARDS F. H., 1917. The fixation of notrigen in faices. *J. Agric. Sci.*, **8**, 299-311.

SAHASRABUDDHE D. L., 1936. Fisxation of nitrogen by rice soils and rice plants. *Pro . Ind. Acad. Sci. Soc. B.*, **3**, 310-319.

SAHASRABUDDHE D. L., ABBYANKARUS, 1936. Nitrogen recuperation in the soils of Bombay Presidency. Part IV. *Indian J. Agric. Sci.*, **6**, 268-315.

SINGH R. M., 1942. The fixation of elementary nitrogen by some of the commonest blue-green algae from the paddy field soils of the United Provinces and BIHAR. *Ind. J. Agric. Sci.*, **12**, 743-756.

SULAIMAN M., 1944. Effect of algal growth on the activity of *Azotobacter* in rice soils. *Indian J. Agric. Sci.*, **14**, 277-283.

SUSCHKINA N., 1949. Rôle de l'eau dans la dispersion de l'*Azotobacter*. *Ecologo-Geographical spread of Azotobacter in the soil of USSR.*

TAKAI Y., 1952. Microbiological studies on paddy soils. *J. Sci. Soil Tokyo*, **23**, 37-41.

TSCHAPEK M., 1955. Actividad del azotobacter en el suelo en relasion con su inhibicion por el oxygeno. *Rev. Invest. agric.*, **9**, 111-135.

TSCHAPEK M., GIAMBIAGI, 1955. Nitorgen in soil of *Azotobacter* its inhibition by oxygen *Arch. Mikro-biol.*, **31**, S. 376-390.

TSCHAPEK M., ROUCO I., 1956. Oxydation-reduction potential and the formation o liesegang's rings by *Azotobacter*. *VIe Congr. Sci. Sol, Paris.*, **3**, **29**, 177-180.

UPPAL B. N., PATEL M. K., DAJI J. A., 1939. Nitrogen fixation in rice soils. *Indian J. Agric. Sci.*, **9**, 689-702.

VERONA O., PICCI G. Mise en évidence du pouvoir N fixateur de *Candida pulcherrima*. *Inform. techn. microbiol.*, n° 1 *Inst. Microbiol. agric.*, Pisa.

WATANABE A., 1950. Fixation of atmosphère nitrogen by Blue-green algae. *Misc. Repts. Res. Inst. Nat. Ressources*, **17**, **18**, 61-68.

WATANABE A., NISHIGAKI KONISHI, 1951. Effect of nitrogen fixing blue-green algae on the growth of rice plants. *Nature*, **168**, 748-49.

WATANABE A., 1956. On the effect of the atmospheric nitrogen-fixing blue-green algae on the yield of rice. *Bot. Mag. Tokyo*, **49**, 820-821.

WILLIS, GREEN, 1948. Movement of nitrogen in flooded soils planted to rice. *Soil. Sci. Soc. Amer. Proc.* **13**, 229-237.

WINOGRADSKY S., 1949. Microbiologie du sol. Problèmes et Méthodes. *Masson, Paris.*

Ann. Agron, 1962, **13** (4), 347-362.

631. 417 (44)

TENEURS DES SOLS DE LA HAUTE-GARONNE EN MATIÈRES ORGANIQUES

J. DECAU, S. FIORAMONTI et H. MALTERRE
Station d'Agronomie, Toulouse (Haute-Garonne).

SOMMAIRE

Mode d'estimation des taux moyens de matières organiques dans les « Petites régions » de la Haute-Garonne.

Caractéristiques géopédologiques et topographiques essentielles de sept régions agricoles.

Déterminants principaux des teneurs des sols en matières organiques : systèmes d'exploitation ; conditions climatiques ; caractéristiques agrologiques (teneurs du sol en éléments grossiers et en argile, réaction) ; topographie et exposition ; fertilisation organique (étendue des prairies permanentes, tonnages de fumier disponibles).

En définitive, on peut dire que la formation et le stockage des matières organiques dans les sols de la Haute-Garonne dépendent davantage des conditions de milieu, édaphiques ou climatiques, que des influences humaines, influences qui cependant sont dans bien des cas très loin d'être négligeables.

A. — INTRODUCTION

La présente étude se propose avant tout, comme objectif, de répondre à la question suivante : quels sont dans le sud-ouest toulousain, les facteurs essentiels régissant la teneur des sols en matières organiques ?

Allongé du nord au sud sur près de 140 km, renfermant des pays extrêmement différenciés aussi bien du point de vue sol et climat (1) qu'en ce qui concerne les systèmes d'exploitation, le département de la Haute-Garonne présente tout un ensemble de caractéristiques particulièrement favorables à une telle recherche.

En fait, on a tenu à l'écart de cet examen les terroirs appartenant à la chaîne pyrénéenne, à ses contreforts et à ses vallées, terroirs où les conditions naturelles,

(1) Au point de vue climatique, on peut signaler à titre d'exemple que d'après les références portées sur les cartes de l'Atlas de France, publiées par le Comité National de Géographie, l'Indice d'aridité passe en Haute-Garonne de 29 à 65 en une centaine de km seulement.

difficiles à déterminer avec précision, varient brutalement à chaque pas : il est demeuré, soumise à cette analyse, une zone de 90 à 95 km de long sur 40 à 80 de large, couvrant une surface très voisine de 500 000 hectares et renfermant sept petites régions différentes.

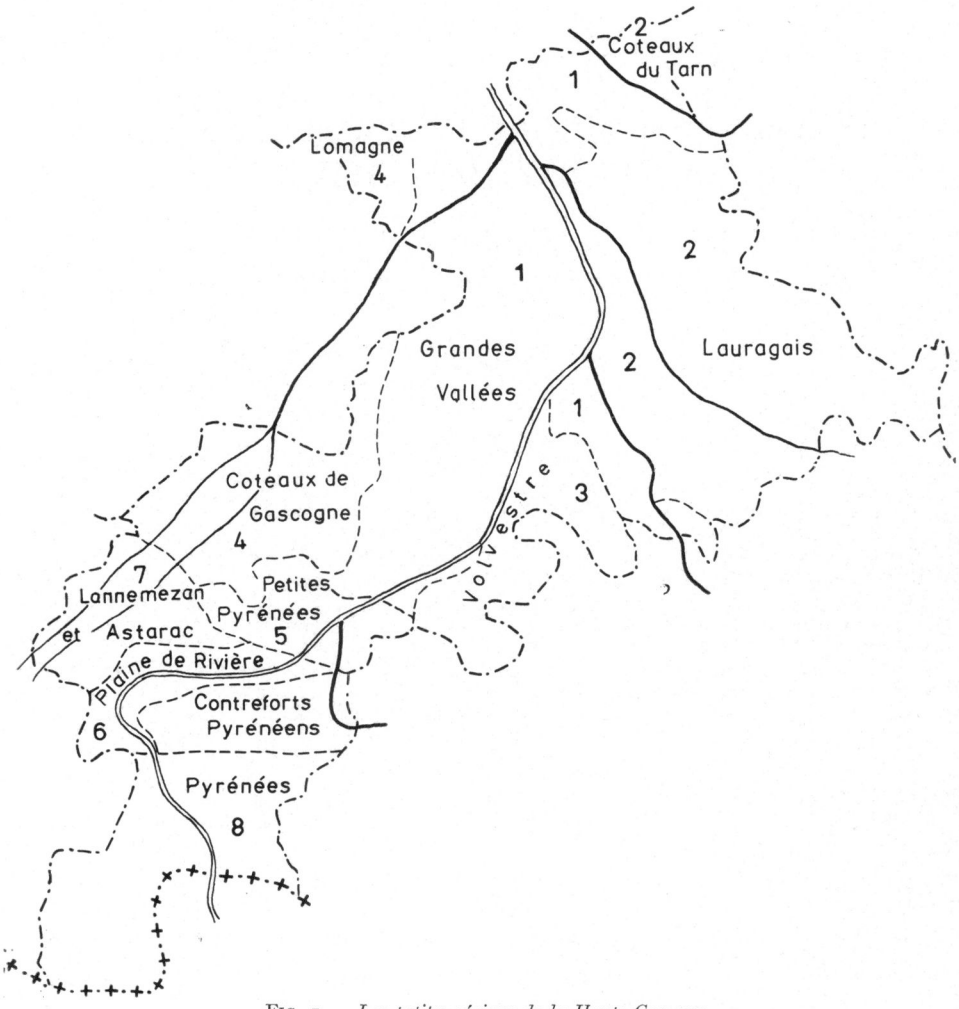


FIG. 1 — *Les petites régions de la Haute-Garonne.*

Ceci dit, lorsqu'on cherche à déterminer la teneur des sols en matières organiques, la perte au feu ne donne qu'une estimation grossière, souvent erronée (DEMOLON, 1954) et il paraît bien préférable de procéder aux estimations en dosant le carbone par oxydation sulfochromique, méthode qui conduit à des résultats peu différents de ceux obtenus par la méthode de référence de DENNSTED (ANNE, 1945, p. 170). Certes, les rapports C/N varient d'une terre à l'autre suivant la texture et l'histoire culturale du sol et aussi suivant le climat, mais, considérés dans notre cadre relativement restreint, ils se groupent en une courbe de Gauss assez étroite pour qu'il soit

possible, avec une précision suffisante, de remplacer la teneur en carbone par celle de l'azote déterminé par la méthode Kjeldahl.

Nous avons exprimé dans tous les cas les résultats en matières organiques en utilisant la relation suivante déterminée expérimentalement pour la zone considérée :

Matières organiques totales : $M\,O = 2{,}37\ \mathrm{C} = 2{,}37 \times 9{,}26\ \mathrm{N} = 22\ \mathrm{N}$.

Ce mode d'évaluation n'est pas exempt de toute critique : sans lui reconnaître une valeur qu'il n'a pas, nous pensons que cette manière d'opérer représente mieux les faits que toute autre et, d'ailleurs, il est toujours aisé de remonter instantanément aux sources en recalculant les taux d'azote correspondants.

Nous disposons, à l'heure actuelle, pour la recherche des relations, présumées de cause à effet, entre les données des deux faces du dyptique, d'une documentation analytique comportant, pour la Haute-Garonne seule, près de 15 000 références. La mise en œuvre d'une telle documentation représentait un travail si considérable qu'il a fallu nous contenter d'examiner seulement une série continue portant sur un millier d'analyses (1 043 exactement). Tel quel, cet échantillonnage représente parfaitement la masse totale ; l'amplifier, malgré la difficulté considérable du travail, n'aurait modifié en rien le sens des conclusions.

B. — LES PETITES RÉGIONS DE LA HAUTE-GARONNE

Les unités naturelles les plus étendues de la zone étudiée couvrent les terrasses fluviatiles de la Garonne (limitées à l'amont par le goulet de Saint-Martory) et de ses affluent principaux (Tarn, Ariège) et les formations mollassiques des coteaux. A ces dernières appartiennent différents terroirs individualisés par leur position géographique : à droite du fleuve et de l'Ariège, c'est le *Lauragais*, entre Garonne et Ariège, le *Volvestre*, à gauche de la vallée, les *coteaux de Gascogne* (partie est du Savès et de l'Astarac oriental) continués au nord par une très petite zone appartenant à la Lomagne.

Au sud, ce territoire, qui intéresse les 3/4 de la Haute-Garonne (les 9/10 de la zone étudiée), est limité par les formations calcaires et marneuses du crétacé terminal et de l'éocène (*Petites Pyrénées*).

A partir d'une ligne Saint Marcet-Blajan, les argiles fluvio-glaciaires de plus en plus fréquentes, tendent à remplacer de plus en plus complètement les formations mollasiques de l'Armagnac. La limite septentrionale de ce territoire, d'ailleurs fort peu étendu en Haute-Garonne, étant assez imprécise, nous le désignons sous l'appel lation unique de *Plateau-de-Lannemezan*, n'ignorant pas pour autant qu'il mord assez largement sur l'Astarac oriental.

La chaîne mineure des *Petites Pyrénées* est séparée de la région montagneuse par la *Plaine-de-Rivière*, premier élargissement de la Vallée de la Garonne, entre Montréjeau et Saint-Gaudens d'une part, entre Saint-Gaudens et Saint-Martory de l'autre.

Quelques-unes des caractéristiques essentielles concernant ces 7 régions sont résumées dans le tableau ci-après.

	Surfaces (en milliers d'hectares)	Stratigraphie	Topographie	Pédologie
1 Grandes vallées	172	Alluvions fluviatiles généralement anciennes plus rarement holocènes.	Terrasses horizontales ou en pentes très douces, à l'exception des plus anciennes qui sont fortement découpées par l'érosion. Altitude comprise dans le département entre 102 et 265 m.	Sols lessivés arrivant parfois jusqu'au stade podzol et dont la zone d'accumulation renferme parfois un alios, le « grepp » formé de graviers cimentés par des oxydes de fer (13). Ces sols silico-argileux ou argilo-siliceux, fréquemment caillouteux présentent un pH acide, sauf quand il s'agit d'alluvions modernes.
2 Lauraguais	143	Mollasses aquitaniennes et stampiennes présentant des alternances de marnes, de lits argilo-calcaires, de sable et argiles renfermant à l'est des niveaux calcaires bien caractérisés.	Collines aux formes arrondies d'altitude médiocre. Point culminant 328 m.	Sols rarement caillouteux à teneur en argile généralement comprises entre 20 et 35 p. 100 (terres-forts) plus ou moins calcaires dans 60 p. 100 des cas.
3 Volvestre	43	Mollasses aquitaniennes (mollasses, marnes, argiles à galets).	Relief du même type que celui observé dans le Lauraguais. Point le plus élevé 395 m.	Mêmes types de sols que dans le Lauraguais, mais avec un pourcentage de sols calcaires légèrement plus faible.
4 Coteaux de Gascogne et du Gers	83	Mollasses miocènes de l'Armagnac.	Relief de même type que dans les deux régions précédentes. Point culminant en Haute-Garonne : 402 m.	Dominance du même type de sol que dans le Lauraguais ; moins de sols calcaires.
5 Petites Pyrénées	26	Formations crétacées et nummulitiques ; niveaux calcaires alternés avec des couches marneuses et des poudingues.	Région accidentée où dominent des crêtes calcaires orientées du nord-ouest vers le sud-est. Altitude maxima : 531 m.	Sols le plus souvent caillouteux, assez rarement calcaires.
6 Plaine de Rivière	23	Alluvions fluviatiles, complètement décalcifiées renfermant des cailloux roulés, parfois de grandes dimensions.	Terrasses horizontales ou en pente douce. Altitude maximum : 498 m.	Sol le plus souvent caillouteux, très rarement calcaire.
7 Plateau de Lannemezan	29	Puissant dépôt pliocène d'argile à cailloux roulés.	Plateaux et collines, culminant à 559 m en Haute-Garonne.	Sols le plus souvent argileux et acides.

C. — INFLUENCE DE DIVERS FACTEURS SUR LA TENEUR DES SOLS EN MATIÈRES ORGANIQUES

L'ordre qui va être suivi dans l'analyse des faits peut parfois sembler illogique et purement arbitraire : il s'est imposé par l'interaction manifeste existant entre certains des facteurs réagissant.

1° Système d'exploitation du sol

L'influence du système de culture est extrêmement nette : comme on pouvait s'y attendre, et nous l'avons observé directement en maintes circonstances, les sols des prairies sont fortement enrichis en matières organiques, les sols portant des plantations de vigne ou d'arbres fruitiers apparaissant au contraire presque toujours fortement appauvris, les terres labourées présentant des teneurs intermédiaires.

Les stocks de matières organiques renfermées par le sol sont d'autant plus faibles que celui-ci reste plus longtemps découvert ; la prairie naturelle qui forme un tapis végétal continu et permanent, les vignes et les vergers, dans lesquels on s'attache le plus souvent à maintenir les interlignes dépouillés de toute végétation, représentent tout naturellement à ce point de vue les deux cas extrêmes.

Les effets défavorables de la dénudation se manifestent par une réduction de l'organisation de l'azote, processus qui est, pour une large part, l'œuvre des végétaux cultivés et adventices, également par une augmentation de la minéralisation dans les couches supérieures sous l'effet de la chaleur (Drouineau, 1953 p. 526) ou du travail du sol, enfin par une augmentation du drainage (Bastisse, 1951 p. 766), ensemble de phénomènes qui conduisent à un accroissement des pertes d'azote par lessivage.

A priori, on pouvait craindre, l'influence des prairies réagissant sur les autres cultures et se continuant dans le temps après défrichement, que la statistique ne reconnaisse pas aux systèmes de culture toute leur importance ; cependant, les différences sont telles que l'examen de la probabilité apparaît sans objet.

	Matières organiques p. cent de terre dans les sols de la Haute-Garonne	
	Nombre d'observations	Teneurs moyennes
Terres labourables	807	2,53
Prairies permanentes	105	3,61
Vignes et vergers	131	1,72

Ces différences se retrouvent dans chaque région naturelle, avec une importance comparable, sur les terrasses de la Garonne aussi bien par exemple que dans le Lauragais ou la Plaine de Rivière.

Il n'est pas utile d'insister davantage si ce n'est pour indiquer que, *sauf en de rares exceptions, qui seront signalées chaque fois, on considérera uniquement dans tout ce qui va suivre, le cas des terres labourables.*

2° Conditions climatiques

Les quantités de matières organiques renfermées par le sol dépendent évidemment de l'équilibre qui s'établit entre les vitesses de formation et de destruction : l'enrichissement s'effectue aux dépens de la végétation spontanée, des résidus de récolte ou

des apports d'amendements humiques, tandis que l'appauvrissemnet se poursuit à la fois par voie physique et par voie microbienne.

Régions naturelles	Matières organiques dans les terres labourables		Pluviosité annuelle	Indice d'aridité	Coefficient de la formule MO = $a \times$ Indice d'aridité.
	Nombre d'obs. (*a*)	Moyennes (*b*)	(*c*)	(*d*)	
1. Grandes vallées...	210	2,05	670	30,1	0,068 1
2. Lauragais	198	2,26	710	32,3	0,070 0
3. Volvestre.....	50	2,43	740	33,9	0,071 7
4. Coteaux du Gers et de Gascogne ...	142	2,65	800	37,4	0,070 9
5. Petites Pyrénées ..	50	2,82	875	41,3	0,068 3
6. Plaine-de-Rivière .	116	3,17	880	41,5	0,076 4
7. Plateau de Lannemezan	41	3,07	980	48,5	0,063 3

(*b*) : moyennes des résultats analytiques dont le nombre est indiqué en (*a*) pour chaque région.
(*c*) : hauteurs annuelles des pluies, calculées en mm par planimétrie des diverses zones de la Carte Gaussen.
(*d*) : indices annuels d'aridité *ia*A = P/T + 10) calculées selon de MARTONNE (1926) à l'aide des indications portées en (*c*) et des températures notées sur la carte d'isothermes dressée par P. REY (1957, p. 11). Pour le Lauragais et le Volvestre, l'évaluation a été effectuée par recoupement sur la planche 15 de l'Atlas du Comité national de Géographie.

Ces divers processus sont sous la dépendance directe des conditions climatiques et il est très naturel que le résultat final soit étroitement fonction de ces conditions ; c'est ainsi que JENNY et ses collaborateurs ont pu chiffrer l'influence des chutes de pluie (JENNY, 1934), ou de la température (JENNY, 1928), sur les teneurs du sol en azote et par conséquent sur les teneurs en matières organiques.

Comme on devait s'y attendre, les déterminations effectuées en Haute-Garonne montrent des liaisons de même ordre. La nature du sol n'ayant, comparativement au climat, qu'une influence secondaire (DROUINEAU, 1953), il a été possible de la négliger en première approximation ; ce qui apparaît remarquable, c'est qu'à la suite de cycles particulièrement complexes, on soit conduit à reconnaître que la teneur moyenne en matières organiques est une fonction linéaire étroite de la pluviosité annuelle et plus encore des caractéristiques pluvio-thermiques tel l'Indice d'aridité défini autrefois par de MARTONNE (1926).

L'examen des chiffres du tableau précédent montre qu'il existe une corrélation extrêmement étroite entre l'indice annuel d'aridité et les teneurs moyennes en matières organiques (r = 0,919, avec un t selon FISHER = 5.28 et P = 0,004).

Les points représentatifs se placent sur une droite passant par l'origine, d'équation :

M. O. = 0,0698 *ia*A, dans laquelle M. O. = moyenne des teneurs en matières organiques p. cent de terre (N $\times$ 22) ; *ia*A = indice annuel d'aridité.

Le calcul et l'étude graphique montrent que si l'on considère les 5 premiers points seulement, la corrélation apparaît encore plus forte, les caractéristiques relatives à la Plaine-de-Rivière et au Lannemezan (points 6 et 7) s'écartant largement de la droite qui vient d'être définie.

Pour ces deux exceptions, qui n'intéressent au total que 5 à 6 pour cent de la zone agricole du département, nous verrons au chapitre III5 d'autres corrélations qui, si

elles n'expliquent pas les causes premières, apparaissent cependant comme très instructives.

Pour les 5 premiers points de la courbe, l'écart maximum entre les moyennes vraies et les moyennes calculées à l'aide de l'indice annuel d'aridité est inférieur en valeur absolue à 0,06 soit à 2.9 p. cent seulement.

Dans un même ordre d'idées, il convenait de se demander si d'autres caractéristiques du climat, telles que celles définissant le complexe ombrothermique, considéré comme l'un des déterminants essentiels de la végétation (P. REY, 1957, p. 80 et suivantes), ne conduisait pas à des relations encore plus étroites. Nous avons vérifié qu'il

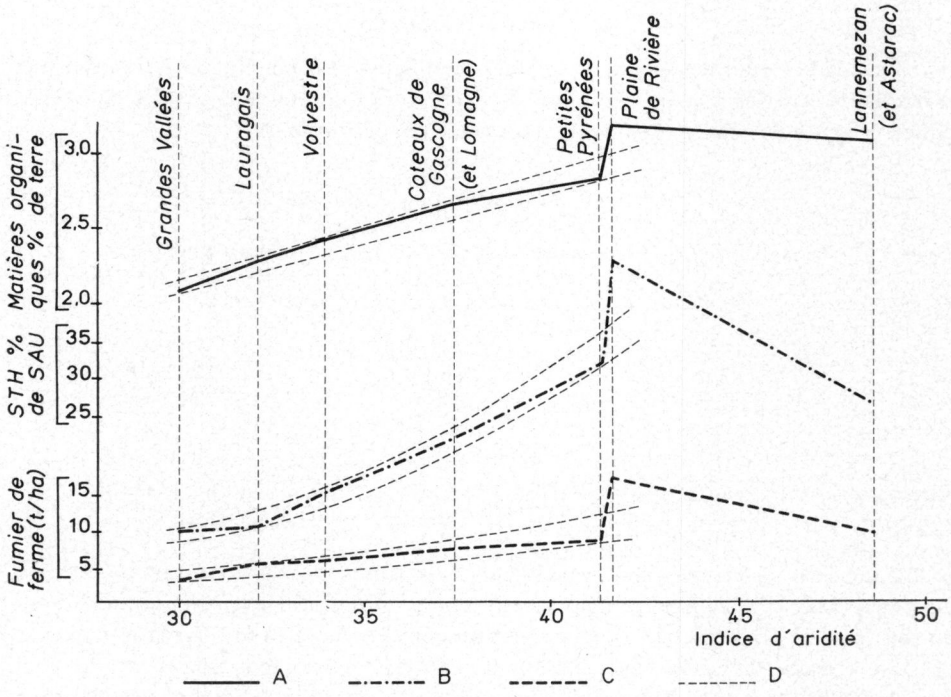


FIG. 2. — *Teneur des sols en humus, importance des prairies et des fumures organiques, fonctions de la sécheresse du climat*

A. — Teneur des sols en matières organiques (moyennes par régions naturelles).
B. — Surfaces toujours en herbe rapportées à la surface agricole utile.
C. — Tonnages de fumier de ferme disponibles par hectare de terres labourables.
D. — Limites normales des zones occupées par les moyennes.

n'en n'était rien notamment pour l'indice de sécheresse $S = \frac{P\ juil. + P\ août}{T\ max.\ été \times 2}$ qui ne tient compte que des données estivales, alors que l'équilibre organique qui s'instaure dans le sol est fonction de la totalité des conditions régnant à toutes les époques de l'année.

Enfin, il serait normal que les vents dominants introduisent des corrections importantes dans les corrélations définies plus haut. Ainsi le vent d'autan dont l'action desséchante a été décrite par H. GAUSSEN (1945, p. 115), ne sévit pas dans toute la région étudiée : les résultats sont là pour montrer que si à certaines périodes son action peut s'ajouter à l'insuffisance des précipitations, elle ne saurait en aucun cas

fausser le sens des résultats, ce qui s'explique en toute vraisemblance par le fait que sa présence s'inscrit, en partie au moins, dans les autres facteurs enregistrés par les météorologues.

3° Composition du sol

En Haute-Garonne, comme cela a déjà été signalé pour d'autres régions (Drouineau, 1953) la nature du sol n'a comparativement au climat qu'une action secondaire, ce qui n'empêche d'ailleurs pas certaines caractéristiques texturales d'avoir une influence extrêmement nette, sur la richesse du sol en matières organiques.

a) *Cailloux et graviers*

Ainsi la présence des éléments grossiers agit souvent d'une manière très marquée et d'ailleurs opposée à ce que l'on aurait pu prévoir en s'appuyant sur des idées classiques. Voici, à cet égard, deux exemples très démonstratifs :

Cailloux et graviers	Matières organiques (N × 22) p. 100 de terre fine					
	Terroir de Plaisance-du-Touch (1)			Plaine-de-Rivière		
	N. d'obs.	Moy.	I. C.	N. d'obs.	Moy.	I. C.
0 à 4,9	20	1,80	100	47	2,83	100
5 à 9,9	12	1,96	109	21	3,09	106
⩾ 10	16	2,44	136	40	3,50	123
	48			108		

(1) Sols ayant subi un labour profond avant plantation de maïs.

Dans certains terroirs, le taux d'éléments grossiers constitue un test permettant de prévoir avec précision les principales caractéristiques pédologiques et agronomiques du sol : ainsi à Plaisance-du-Touch, commune qui s'étend à la fois sur la moyenne et la basse terrasse de la Garonne, lorsque le taux de cailloux et graviers atteint 10 p. cent dans l'horizon de surface il y a 9 chances sur 10 pour que le sol renferme du grepp (alios plus ou moins consolidé) à faible profondeur et souffre l'hiver, de ce fait, d'un excès d'humidité. Lorsque la terre arable renferme moins de 2,5 p. 100 d'éléments grossiers, on est presque toujours en présence d'un colluvion dans lequel le régime hydrique est beaucoup plus favorable (Malterre, 1956, p. 521 et 525).

Les différences de perméabilité sont donc manifestes entre les différents types de sol sur alluvions ; les « graves » sont souvent noyés l'hiver et se dessèchent très rapidement au printemps, circonstances qui sont peu favorables à une nitrification active et à une destruction rapide de la matière organique. Dans les terroirs, renfermant de tels types de sols, on pouvait prévoir à priori une corrélation positive entre la teneur du sol en éléments grossiers et sa teneur en matières organiques et c'est ce que l'on observe à Plaisance.

Dans la Plaine-de-Rivière, en l'absence de « grepp », on arrive à des résultats très comparables à ceux observés à Plaisance-du-Touch. Très visiblement ce résultat est atteint par un mécanisme très différent et non encore étudié.

Enfin signalons, sans y insister davantage, la constance remaquable des taux de matières organiques qui apparaît si l'on rapporte ces derniers, non plus à la terre fine, mais à la terre totale.

Cailloux et graviers pour cent	Matières organiques pour cent de terre brute			
	Terroir de Plaisance-du-Touch (1)		Plaine-de-Rivière	
	moyenne	I. C.	moyenne	I. C.
0 à 4,9	1,76	100	2,77	100
5 à 9,9	1,83	104	2,87	103
⩾ 10	1,78	101	2,63	95

(1) Il s'agit comme précédemment de prélèvements effectués sur des sols fraîchement labourés à 35/40 cm en vue de leur plantation en maïs grain ; pour rendre ces résultats comparables aux autres, il faudrait les multiplier par 1,20 ou 1,25.

Autrement dit, le stock total de matières organiques par hectare de terre dépend peu de la teneur du sol en éléments grossiers.

b) *Texture de la terre fine*

Il est souvent très difficile de mettre en évidence l'influence du taux d'argile, cette dernière étant systématiquement masquée par d'autres beaucoup plus fortes Ainsi à Plaisance-du-Touch on a :

Argile pour cent	Matières organiques pour cent de terre fine		
	Nombre d'observations	Moyennes	I. C.
8,5 à 13,6	28	1,99	101,5
13,8 à 20,1	25	1,92	98,0
Totaux et Moyennes	53	1,96	100,0

Cependant, si l'on considère à part, par exemple le cas des sols renfermant peu d'éléments grossiers, on obtient, à Plaisance-du-Touch toujours, une indication nette mais non significative :

Argile p. 100 de terre	Matières organiques pour cent de terre fine dans les sols renfermant moins de 5 p. 100 de cailloux et graviers		
	Nombre d'observations	Moyennes	I. C.
8,5 à 13,6	11	1,66	100
13,8 à 20,1	11	1,81	109

Dans le même ordre d'idées, l'examen des résultats par région naturelle montre aussi un accroissement relatif des taux de matières organiques dans le pays où dominent les sols argilo-calcaires par rapport aux résultats notés dans les pays dont les sols sont silico-argileux et plus ou moins acides : cependant, les différences sont très faibles et l'on peut se contenter de noter que les points figuratifs se situent au-dessus de l'axe de normalité pour les régions argilo-calcaires (Lauragais, Volvestre, Coteaux de Gascogne), en dessous de l'axe 2 fois sur 3 pour les régions silico-argileuses (Grandes vallées, Petites Pyrénées ; exception : Plaine-de-Rivière).

Les accroissements dus à la nature du sol qui sont extrêmement faibles, se superposant aux accroissements, beaucoup plus importants, imputables aux conditions climatériques, et ne peuvent être jugés indépendamment de ces derniers (voir fig. 2).

c) *Réaction du sol*

L'importance du rôle joué par le pH, dans les diverses étapes de l'évolution des matières organiques du sol est bien connue : on pouvait donc prévoir une liaison étroite entre les teneurs de la terre en matières organiques et la réaction du milieu. Cependant, ces liaisons sont multiples et complexes, si bien que l'influence globale n'est pas toujours particulièrement nette.

A Plaisance-du-Touch, sur alluvions anciennes, nous avons noté :

pH compris entre :	Teneur de la terre fine en matières organiques	
	Nombre de cas	Moyennes
5,1 et 5,9	17	2,02
6,0 et 6,3	19	2,01
6,4 et 7,3	17	1,82

La différence entre les teneurs caractéristiques des sols acides et des sols neutres est significative avec une probabilité élevée ($P < 0,05$). Ainsi, dans les terres de culture, la matière organique s'accumule fréquemment dans les sols acides, tandis qu'elle se détruit plus rapidement dans les milieux neutres.

Les observations ont été toutes différentes pour les terres complantées en vigne ; sur alluvions anciennes toujours, on est conduit aux résultats suivants :

pH	Nombre d'observations	Matières organiques	
		Moyenne	inférieur à 1,10 (Nombre de cas pour cent)
inférieur à 5,5	31	1,32	48,4
compris entre 5,5 et 6,0	28	1,72	21,4
supérieur à 6,0	28		14,3

Il faut reconnaître qu'ici la corrélation, bien que positive est assez lâche ($r = + 0,30$; $p : 0,03$) ; il semble cependant qu'après plantation les terres voient leur teneur en matières organiques et leur pH baisser rapidement. Le gaz carbonique

résultant de la destruction de la matière organique est partiellement entraîné dans les eaux de drainage sous forme de bicarbonate, de sorte que l'abaissement du pH, consécutif à l'élimination des cations, apparaît comme un effet et non comme une cause de la disparition des matières organiques.

4° Topographie et exposition

Les mécanismes d'action de ces facteurs sont bien connus ; suivant leur exposition les flancs des coteaux sont soumis à des micro-climats fort différents : nécessairement la formation et la destruction, donc le stockage des matières organiques obéissent, sur chaque versant, à des rythmes différents.

Pour ce qui est de la topographie, il est évident et bien connu que l'érosion par les eaux sauvages, provoque un appauvrissement constant du sol en matières organiques, appauvrissement d'autant plus marqué que la pente est plus accusée.

Cependant ces influences, bien que manifeste, sont très difficiles à mettre en évidence par des statistiques suffisamment étayées ; ces difficultés s'expliquent sans effort :

— sur les versants opposés, les types de sols et les modes de culture sont différents, ce qui rend particulièrement difficile toute comparaison.

— la pente, en plus des variations pédologiques qu'elle entraîne, agit de deux façons différentes : la tranche de pluie varie avec elle et ce d'une façon variable suivant la trajectoire imposés aux gouttes par la direction et la force des vents ; en second lieu, elle agit directement sur l'intensité de l'érosion.

A titre d'exemple, voici quelques résultats calculés dans le canton de Villefranche-de-Lauragais (76 prélèvements sur lesquels n'ont été retenus que les sols classés parmi les terreforts types (cailloux et graviers < 10 ; calcaire < 10 ; argile $\geqslant 15$.

Matières organiques dans les terreforts de Villefranche-de-Lauragais

Surface	Nombre d'observations	Moyenne
Horizontale ou sub-horizontale	26	2,25
Pentes faibles.....	14	2,29
Pentes fortes	11	2,18

L'indication enregistrée dans le sens de l'appauvrissement de l'horizon superficiel sur les fortes pentes est à peine perceptible, nullement significative.

Par contre, ce qui semble plus facile à établir, c'est l'accumulation de la matière organique aux ruptures de pente : les sols des vallées internes apparaissent fortement enrichis par rapport aux sols des pentes voisines, mais, là encore, on se trouve la plupart du temps en présence de types pédologiques non directement comparables.

5° Fertilisation organique

La prairie agit directement sur la richesse du sol qui la supporte par accumulation et par ralentissement de la destruction de l'humus formé ; indirectement, par l'intermédiaire de l'élevage, elle enrichit les terres de labour, action qui est

d'ailleurs d'autant plus sensible qu'à tout accroissement des surfaces enherbées correspond évidemment une diminution égale des surfaces à amender, ce qui provoque nécessairement une efficacité plus que proportionnelle de cet accroissement.

Sans nous préoccuper pour l'instant des surfaces couvertes par des prairies artificielles et temporaires, prairies qui pourront probablement jouer un rôle dans un avenir proche, il paraît donc de haut intérêt de considérer le rapport existant entre les prairies permanentes (l'S T H ou surface toujours en herbe des économistes agricoles) et la surface agricole utile (S A U = S T H + surface des terres labourables et des vignes et vergers).

D'autre part, nous avons évalué les tonnages de fumier de ferme disponibles, en appliquant la formule :

F (en tonnes) = 8,5 ch + 11 bov + 0,9 ov.

(ch, bov, ov, respectivement nombre de chevaux, de bovins et d'ovins par hectare) formule établie en admettant avec R. BRACONNIER (Larousse Agricole, p. 97) qu'un bovin de 500 kg produit annuellement 10 à 12 tonnes de fumier, un cheval de poids moyen de 7 à 10 tonnes, un ovin de 0,7 à 1 tonne.

Or, les données, S T H p. 100 de S A U, quantités de fumier de ferme, données qui sont liées étroitement l'un à l'autre, apparaissent, toutes deux, comme étant fonction du climat. Leur représentation a été portée sur le graphique n° 2, au-dessous de la courbe correspondant aux variations de la matière organique en fonction de l'indice d'aridité.

Régions	Zone de référence	Indice d'aridité	Fertilisation organique	
			Fumier disponible en tonnes/ha	S T H p. 100 de S A U
1. Grandes vallées	Grenade	30,1	3,1	9,5
2. Lauraguais	Caraman	32,2	5,1	10,4
3. Volvestre	Totalité	33,9	5,2	14,6
4. Coteaux de Gascogne ..	L'Isle-en-Dodon	37,4	7,2	22,1
5. Petites Pyrénées.....	Saint-Martory	41,3	8,6	32,2
6. Plaine-de-Rivière	Totalité	41,5	16,0	45,7
7. Lannemezan	Totalité	48,4	8,9	25,6

Dans ce tableau, comme dans celui du chapitre III 2, les régions ont été classées par ordre de pluviosité croissante. Les chiffres indiqués dans les deux dernières colonnes correspondent aux résultats de la Statistique agricole de 1954. Pour les Grandes vallées, le Lauraguais, les Coteaux-de-Gascogne, les Petites Pyrénées, on a choisi, pour les calculs, des cantons types représentant parfaitement la région. Pour les trois autres, on a été conduit à considérer l'ensemble du territoire, aucun canton n'appartenant en entier à la petite région considérée.

Ceci dit, la courbe représentative de S T H p. 100 de S A U n'est pas, comme celle de la matière organique, une droite. La courbe qui se superposait le mieux à cette fonction répondrait à la formule :

log 100 STH/SAU = 0,0005 *ia*A (*ia*A + 33).

Il faut d'ailleurs remarquer que la parabole figurée dans le deuxième membre de l'équation diffère peu d'une droite, mais il est beaucoup plus important de noter

une parenté frappante existant entre chacune des trois courbes, parenté très apparente sur la figure 2 :

— Les cinq premières régions inscrivent leurs résultats sur des portions de courbes (droite pour la matière organique, logarithmique parabolique pour les deux autres fonctions) que nous qualifierons de normales.

— La 6e (Plaine-de-Rivière) situe son point figuratif très au-dessus, la 7e (Lannemezan) très au-dessous des prolongements des courbes précédentes.

Ce parallélisme montre la corrélation existant entre les surfaces toujours en herbe ou les tonnages de fumier disponible d'une part, la richesse des sols en matière organiques de l'autre ; il est imputable à l'influence commune de mêmes déterminants, climatiques ou autres, ces considérations permettant, en outre, d'expliquer dans une certaine mesure les exceptions marquées par le Lannemezan et par la Plaine-de-Rivière.

Dans la Plaine-de-Rivière, les surfaces consacrées à l'herbe sont très supérieures à celles notées dans les autres régions et la densité du cheptel est d'autant plus importante que la proximité de pacages de montagnes permet une certaine forme de transhumance, en sorte que les quantités de fumier épandues par l'agriculteur permettent d'entretenir des teneurs en matières organiques et en azote exceptionnellement élevées ; il convient en plus de noter une dyssimétrie stratigraphique de la région (Thirion), dissymétrie qui s'accompagne d'une dissymétrie considérable dans la répartition des matières organiques (moyennes : 2,82 sur la rive gauche du fleuve, 3,55 sur la rive droite). Nous avons vérifié que les différences existant dans les teneurs en éléments grossiers ne pouvait justifier qu'une partie des différences constatées dans les teneurs en matière organique ; il n'est pas exclu, par ailleurs, que le colluvionnement aux dépens des sols des premiers contreforts ait influencé la teneur en matières organiques des sols de la rive droite.

Le Lannemezan (1), bien au contraire, est une région pauvre, au climat excessif, peu peuplé en hommes et en animaux : l'élevage est beaucoup moins important qu'on aurait pu le prévoir sur le vu de la seule pluviosité. Ces circonstances provoquent la sous-exploitation des terres et expliquent que les sols soient nettement moins pourvus qu'ils ne devraient l'être compte tenu de la seule humidité climatique.

D. CONCLUSIONS

Considérée dans un cadre relativement restreint (Pays toulousain et Comminges), mais présentant cependant de très importantes variations de constitution, la teneur moyenne des sols en matières organiques apparaît comme étant étroitement fonction de certaines caractéristiques du milieu tant agrologiques que climatiques (teneurs des sols en éléments grossiers, sécheresse du climat par exemple).

Par contre, il est souvent bien difficile de mettre en évidence par voie statistique d'autres influences tout aussi indiscutables que les premières, soit que les conditions nécessaires à des comparaisons probantes ne puissent être réunies qu'excep-

(1) Au point de vue statistique, en raison de la faiblesse des surfaces mises en jeu on a joint à la partie du Lannemezan située en Haute-Garonne, la portion sud-ouest de l'Astarac oriental, inscrite dans les mêmes limites administratives.

tionnellement (exposition, topographie), soit que le facteur envisagé agisse de façons diverses, susceptibles de se masquer les unes les autres ou tout au moins d'amenuiser leurs effets globaux (réaction du sol).

Pour l'ensemble, on peut dire que l'influence des facteurs naturels l'emporte largement sur les influences humaines. Sans doute, ces dernières peuvent être parfois extrêmement importantes (choix du système d'exploitation du sol, extension ou réduction de l'élevage), mais, même en ce cas, le praticien subit davantage les données générales du problème qu'il ne les dirige. Il ne peut imprimer sa marque dans les résultats qu'à la condition d'un respect minimum des impératifs résultant de la contexture du milieu.

Reçu pour publication en mai 1962

SUMMARY

THE ORGANIC-MATTER CONTENT OF SOILS OF THE HAUTE-GARONNE

The Haute-Garonne department, extending from north to south over 140 km of different pedological and climatic environments, exhibits a wide range of organic-matter levels varying from one location to another and according to regions, depending on the nature and origin of the soil, on situation and on the agricultural practices applied.

The vineyard soils in the dry zones of the Toulouse region are lowest in organic matter (0.7 — 1.2 p. 100 total organic matter in old plantations) ; plowed soils are often poor in organic matter in regions of low rainfall (great valleys, Lauraguais, Volvestre), but much richer under a humid climate (Lower-Pyrénées, river plains, Lannemezan plateau) ; grassland soils are always well provided with organic matter.

Flinty soils often appear to be much provided in organic matter as compared with slightly gravelly soils or soils completly lacking coarse constituents, due to great differences in water circulation.

Statistical analysis, using a known environment as reference, showed in all regions a close correlation between organic-matter levels of the soil and annual rainfall or various factors including rainfall and temperature. Thus, organic-matter contents seem for instance, to be in a linear relationship with the annual index of droughtiness, the difference between the average values calculated and average values calculated and measured being very small in all regions where animal husbandy had not been artificially developed (river plains) or excessively reduced (Lannemezan plateau).

ZUSAMMENFASSUNG

VOM GEHALT AN ORGANISCHER SUBSTANZ DER BÖDEN DER OBEREN GARONNE.

Das Departement der Haute-Garonne, welches sich von Süden nach Norden auf 140 km pedologisch und klimatisch verschiedene Gebiete erstreckt, hat eine reichhaltige Skala für den Gehalt an organischer Substanz, die sich von Gegend zu Gegend ändert, je nach Art und Herkunft des Bodens, je nach der Lage und dem Bewirtschaftungsystem.

Die Rebenböden der trockensten Zonen des Toulousain stellen die unterste Grenze an organischem Gehalt dar (0,7 — 1,2 p 100 organ. Gesamtmasse in den alten Pflanzungen) die Ackerböden sind oft arm in den trockeren Gegenden (Täler, Lauragais, Volvestre), jedoch viel reicher sobald das klima feucht wird (Petites Pyrénées, Plaine-de-Rivière, Plateau du Lannemezan). Was die Wiesenböden betrifft, so sind diese überall arm.

Die Kieselböden sind oft stark angereichert, im Vergleich zu den leichteren sandigen Böden oder denen, die gänzlich der groben Elemente entbehren ; die einen sowie die andern sind sehr verschieden in Bezug auf die Wasserbewegung.

Ausserdem zeigt eine Statistik mit über tausend Referenzen eine sehr enge Korrelation pro Gegend zwischen dem Gehalt an org. Substanz einerseits, der Gesamtregenmenge des Jahres oder noch besser den verschiedenen, Regen und Temperatur umfassenden Daten andrerseits.

So erscheint die org. Substanz als eine lineare Funktion, z. B. des jährlichen Trockenheisindexes, da die Abweichungen von den errechneten Mittelwerten dieser Relation und die errechneten Mittelwerte auf dem Felde sehr gering sind in allen jenen Gegenden, in denen die Viehzucht nicht künstlich entwickelt (Plaine-de-Rivière) oder abnormal verringert wurde (Plateau du Lannemezan).

Содержание органического вещества в почвах Верхней Гаронны.

С. ДЭКО, С. ФИОРАМОНТИ и Г. МАЛЬТЕРР (Тулуза).

Департамент Верхней Гаронны растянут на 140 км. с севера на юг через разнообразные педологические и климатические пояса и поэтому содержание органического вещества в его почвах представляет обширную гамму; от одного конца к другому содержания эти меняются от районов и местонахождения данного пункта, от природы и происхождения почв, а также от способов их обработки.

Почвы виноградников наиболее засушливых районов Тулузской области находятся на границе минимального содержания органического вещества (от 0,7 до 1,2 процента общего количества органического вещества в старых посадках). Пахотные почвы часто бедны органическим веществом в районах минимальной влажности (Большие Долины, Лорагэ, Вольвестр), но в климате более влажном (Малые Пиринеи, Плэн-де-Ривьер, Ланмезанское плоскогорье) — содержание это увеличивается; что-же касается почв луговых, то они обеспечены органическим веществом достаточно и повсюду.

Каменистые почвы часто более богаты чем почвы щебнистые или почвы в которых наблюдается полное отсутствие крупных элементов; об' ясняется это различием их водного режима.

С другой стороны, статистические данные показали что в тысяче различных случаев существует в каждом районе узкая корреляция между содержанием органического вещества в почве и общим годовым количеством осадков, или лучше сказать различными данными включающими осадки и температуру.

Можно таким образом сказать что органическое вещество является как-бы линейной функцией годового показателя аридности, например; ибо разница между средними выведенными при помощи этой формулы и средними полученными при практических измерениях на местах, невелика во всех районах где не было искуственно развито (Плэн-де-Ривьер) или-же ненормально сокращено (Ланмезанское плоскогорье) — скотоводство.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ANNE P., 1945. Sur le dosage rapide du carbone organique des sols. *Ann. Agron.*, **15**, 161.

BASTISSE E. M., 1951. Dix-huit années d'études lysimétriques appliquées à l'Agronomie. *Ann. agron.*, 724.

BRACONNIER R., 1952. Larousse Agricole, 2e éd.

Carte géologique de la France, Feuilles nº 217, 218, 229, 230, 241 et 242.

Comité National de Géographie. Atlas de France, Planche nº15. Précipitations et Indice d'aridité.

DEMOLON A., 1961. Dynamique du sol, 5e éd.

DROUINEAU G., 1953. L'azote du sol. *Bull. Tech. Inform. Ing. Serv. Agric.*, nº 81, 503.

DROUINEAU G, LEFEVRE G., Mme BLANC-AICARD, 1953. *C. R. Acad. Sci*, 525-527.

GAUSSEN H. Carte de la pluviosité annuelle dans le Sud-ouest de la France et les Pyrénées, éditée par le ministère des Travaux Publics (Direction des forces hydrauliques).

GAUSSEN H., 1945. Le climat de la région de Toulouse et son influence sur l'agriculture. *Bull. Agr. Sud-Ouest*, **5**, nº233, 110.

JENNY H., 1928. Relation of climatic factors the amount of nitrogen in soils. *Anal Am. Sc. Agr.*, **20**, nº 9.

JENNY H, CHESTER D., LEONARD, 1934. Fonctionnal relationships between soil properties and rainfall. *Soil. Sci.*, **38**, 363.

LIWERANT J., 1939. Les sols d'alluvions de la vallée de la Garonne. *Ann. Agron*, **9**, 438.

MALTERRE H., 1950. Les sols de la Haute-Garonne et leur évolution. *Bull. Agr. Sud-Ouest,* 89.

MALTERRE H., 1956. Degré de finesse et capacité de production des alluvions fluviatiles du Pays toulousain. VIe *Congr. Int. Sci. Sol.,* **5**, 85, 521.

MALTERRE H., FIORAMONTI S., 1954. Signification et résultats de l'analyse des terres en Haute-Garonne *Bull. Agr. Sud-Ouest,* 127.

MARTONNE Em. de, 1926. Une nouvelle fonction climatique, l'Indice d'aridité. *La Météorologie.*

MARTY J. R., FIORAMONTI S., BOSC M., 1959. Les sols du Lauragais. *Bull. Assoc. Franc. Et. Sol,* n° 6. 290.

REY P., 1957. Écologie Générale des Coteaux de Gascogne, C. N. R. S.

Statistique agricole 1954. Direction des Services Agricoles de la Haute-Garonne.

THIRION Ch., 1945. La méthode Müntz améliorée et l'étude du pouvoir filtrant des sols de quelques secteurs des vallées de l'Ariège, de la Garonne et du Gave de Pau, Paris.

Ann. agron., 1962, **13** (4), 363-372

631. 481 : 631. 411. 3 (44)

LES ARGILES DU BASSIN DE MORMOIRON (VAUCLUSE) ET LES PHÉNOMÈNES PÉDOLOGIQUES ANCIENS

R. GUENNELON

Station d'Agronomie, Centre de Recherches agronomiques du Sud-Est, Montfavet (Vaucluse)

SOMMAIRE

On tente de relier l'existence d'argiles allant de la kaolinite à la palygorskite dans la région de Mormoiron (Vaucluse), à des phénomènes paléopédologiques affectant les terrains tertiaires de ce bassin. Le kaolin serait dû à une altération latéritique, et les autres argiles seraient néoformées à partir des éléments solubles libérés par la latéritisation.

L'existence d'argiles du type attapulgite-palygorskite, décrites par DE LAPPARENT, près de Mormoiron (Vaucluse), a été expliquée par divers auteurs (MILLOT, RADIER, BONIFAS, 1957), qui y voient l'influence des massifs hercyniens, ayant subi d'une part l'altération latéritique et cédé d'autre part, sous forme ionique, de la silice et des bases. Celles-ci seraient susceptibles de donner, par néoformation, des minéraux argileux à rapport SiO_2/Al_2O_3, élevé. Les bases de cette théorie ont été exposées par ERHART (1956), sous le terme de *Bio-rhexistasie*, au moins en ce qui concerne la possibilité d'un lessivage différentiel, consécutif à l'altération latéritique. « Nous savons aujourd'hui par l'étude des phénomènes de latéritisation..., que l'altération pédogénétique des roches cristallines silicatées alumineuses conduit à des argiles latéritiques ou à des allites..., minéraux résiduels de la pédogenèse. Au contraire, toutes les bases alcalines et alcalino-terreuses (Ca, Mg, K, Na), ainsi que toute la silice des silicates autres que la kaolinite sont exportées. Ces éléments constituent la phase migratrice soluble ». (ERHART, loc. sit., p. 9).

Dès 1947, EDELMAN (1947), proposait un schéma pour les sols des zones tropicales, où les migrations ioniques, à partir des sols latéritiques (ou en voie de latéritisation), permettaient d'expliquer la formation de sols noirs à montmorillonite.

En 1956, VAN DER MAREL étudiant une argile de La Roque-sur-Pernes, dans l'Oligocène de Vaucluse (VAN DER MAREL, 1956 *a*), s'étonnait de l'existence de cette argile à grande distance des régions volcaniques du Massif central ou des massifs pyrénéo-provençaux (VAN DER MAREL, 1956 b).

C'est pour essayer de concilier ces faits, qu'une étude des minéraux argileux du bassin de Mormoiron a été entreprise et c'est le but de cette note d'exprimer les premières hypothèses suggérées par les observations effectuées.

I. — DESCRIPTION GÉOLOGIQUE DU BASSIN DE MORMOIRON

L'ossature, ou plutôt le soubassement de ce bassin, en demi-cuvette, bordé vers l'ouest, par une crête burdigalienne, et ses contre-forts orientaux, sont constitués, comme tout le relief de la basse vallée du Rhône, par des calcaires du Crétacé inférieur ; ces calcaires blancs, zoogènes, présentent au sommet le faciès urgonien, et sont déposés à la limite sud de la fosse vocontienne. Ils se terminent par des calcaires gris en plaquettes de l'Aptien inférieur ; l'Aptien supérieur reste marin avec des marnes grises à poissons, à fossiles siliceux (Bélemnites) et pyriteux (Ammonites).

A l'Albien, un changement profond se produit dans la sédimentation : les calcaires et les marnes laissent la place à des formations sableuses, souvent rubéfiées, rutilantes, chronologiquement équivalentes aux bauxites des Alpilles. A cette époque, s'individualise un isthme reliant le Massif central aux Maures et à l'Esterel, et, sur lequel on note les gisements de bauxite. Le bassin de Mormoiron fonctionne alors comme une zone littorale où s'accumulent des sables à bois flottés et des grès à Ammonites. Ces sables siliceux, ocreux, se retrouvent plus à l'est vers Apt, où ils forment les ocres de Roussillon, avec à leur sommet, une cuirasse gréseuse, ferrifère, contenant des nodules argileux kaoliniques.

Dans ce bassin, le Cénomanien est formé de grès ou de sable gréseux, dont la morphoscopie des grains de quartz n'indique pas une origine éolienne.

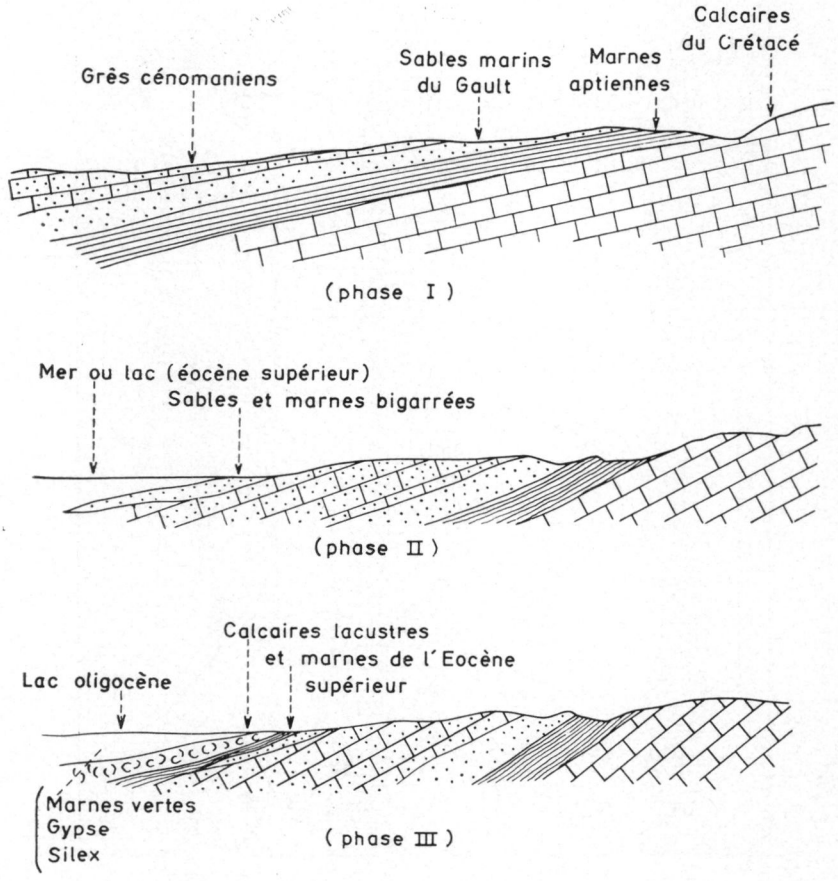
TABLEAU I

Morphoscopie des quartz du grès Cénomanien

Pourcentage de	Non usés	Ronds mats	Emoussés luisants
Tailles en mm 0,990 à 0,620	0	0	0
Tailles en mm 0,620 à 0,450	30	10	60
Tailles en mm 0,450 à 0,360	1-2	20	78
Tailles en mm 0,360 à 0,280	2	12	86

L'Éocène, détritique, est continental. En effet, les monts de Provence achèvent de se plisser (chaîne pyrénéo-provençale) et émergent entièrement, le mouvement se prolongeant jusqu'à l'Oligocène, où les plissements alpins débuteront pour s'amplifier au Miocène. Les contre coups des plissements alpins provoquent des failles affectant jusqu'aux terrains Miocènes.

La première lacune de sédimentation, dans cette région, s'étend du Cénomanien au Sparnacien. Elle affecte donc le Turonien, le Sénonien, le Danien-Montien et le Thanétien (pro parte). A la reprise, on trouve des terrains détritiques avec sables bigarrés de l'Éocène inférieur, des bancs argileux, des lignites riches en soufre.



Phase I. — Lacune stratigraphique du Turonien (inclus) au Thanétien-Sparnacien

Phase II. — Dépôts marins et lacustres des marnes et calcaires éconénes

Phase III. — Dépôts lacustres des marnes vertes (attapulgites), gypse et calcaires à silex, à ossements phosphatés

Fig. 1 — *Évolution du bassin de Mormoiron du Crétacé supérieur à l'oligocène*

Puis viennent des marnes et des calcaires lacustres appartenant à l'Éocène moyen et supérieur.

Enfin à l'Oligocène, se déposent des marnes vertes à ossements phosphatés, des gypses, des calcaires à silex, des calcaires dolomitiques. Le Miocène marin débute par un conglomérat aquitanien, de galets à patine verte, avec immédiatement au-dessus les sables et la mollasse calcaire avec faciès récifal.

APTIEN

Aptien inférieur. calcaire faciès urgonien.

Aptien inférieur. calcaire de Lure.

Aptien inférieur. calcaire en plaquettes.

Aptien supérieur. Marnes grises pyriteuses.

ALBIEN-CENOMANIEN

Grès à Ammonites.

Sables marins.

Grès.

Grès marneux à Ammonites.

EOCENE

Eocène inférieur. Sables bigarrés, argiles et lignites (Méthamis).

Eocène moyen et supérieur. Marnes blanches, calcaires à silex, calcaires lacustres.

Failles.

OLIGOCENE (s.l.)

Marnes vertes, calcaires et gypse de Mormoiron.

Calcaire lacustre, silex, gypse.

Conglomérat Eocène-Oligocène de Crillon.

MIOCENE

Tous les terrains postérieurs à la transgression burdigalienne.

FIG. 2 — *Schéma du bassin de Mormoiron*

L'affaissement progressif du bassin à l'Oligocène-Miocène est marqué au nord, par un grand cône de déjection, orienté nord-sud, constitué par des argiles ocreuses, des marnes et des galets calcaires.

La diversité des matériaux relevés depuis le Crétacé inférieur, montre qu'une succession de phénomènes géologiques a réalisé une grande variabilité de faciès. Des sédiments marins, à Céphalopodes, des sédiments lacustres, lagunaires, des restes végétaux et des mammifères terrestres, jalonnent l'histoire de ce bassin ; les sédiments argileux n'y sont pas moins variés.

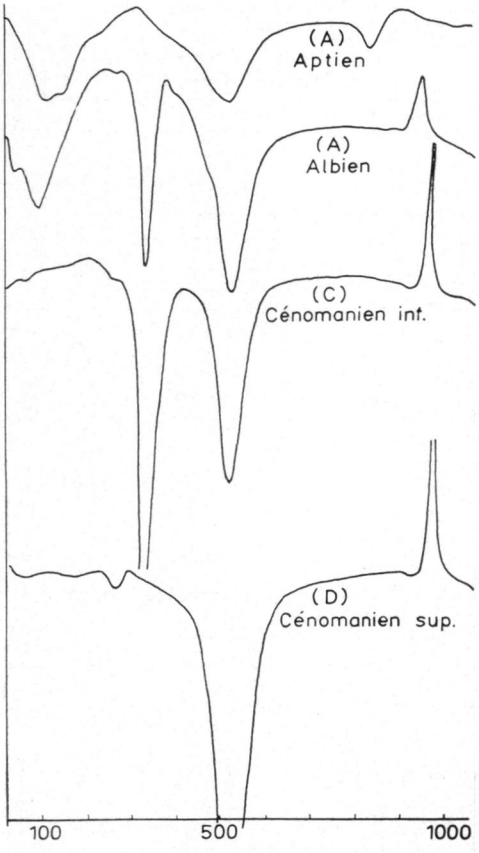


FIG. 3 — *A. T. D. des principales argiles*

Les sables rouges de *l'Albien* (Gault), contiennent du kaolin, mêlé à un peu d'illite, pouvant provenir de l'érosion des marnes aptiennes, et des hydroxydes de fer. *Au Cénomanien inférieur et au Cénomanien supérieur,* on trouve principalement des kaolins associés ou non à de la gœthite. Après la lacune stratigraphique déjà citée, c'est-à-dire à *l'Éocène inférieur,* le kaolin persiste associé à de la vermiculite, puis disparaît à *l'Éocène moyen,* où ne demeure que la Vermiculite.

TABLEAU 2

Étages géologiques faciès, et types d'argiles

Stratigraphie		Formations pétrographiques et faciès	Nature des Argiles
Oligocène	Stampien Sannoisien	Calcaires lacustres, à silex, gypses et Argiles vertes de Mormoiron.	Palygorskite Palygorskite Palygorskite
Supérieur	Ludien Lédien	Calcaire lacustre de Jocas et Argiles blanches.	Palygorskite
Éocène moyen	Lutetien	Marnes et marnes calcaires.	Vermiculite
Inférieur	Ypresien Sparnacien Thanétien Montien	Sables bigarrés, Argiles plastiques, Lignites.	Vermiculite Kaolinite
Crétacé sup.	Danien Senonien Turonien		
		Sables gréseux et grès marneux	Kaolinite
	Cenomanien	Grès	Kaolinite Gœthite
	Albien	Sables marins à végétaux et grès sableux	Kaolinite, Illite, Gœthite
	Aptien	Marnes grises pyriteuses	Illite, Vermiculite
		Calcaires en plaquettes.	

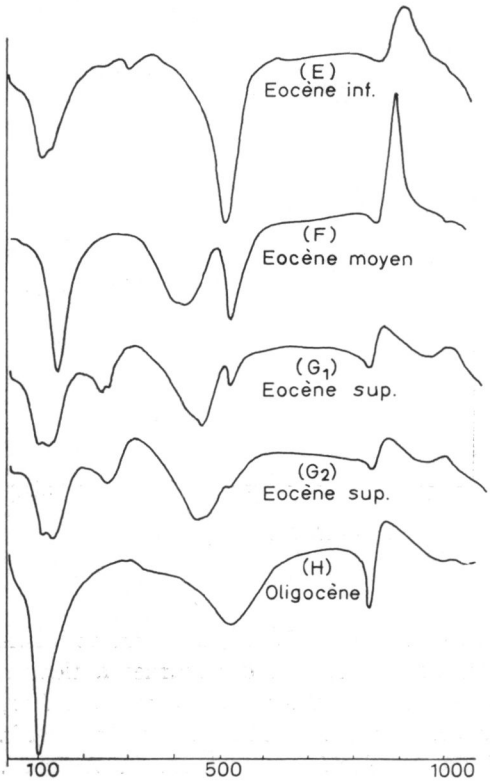


FIG. 3 *(bis)* — *A. T. D. des principales argiles*

Enfin celle-ci cède a place aux argiles du type palygorskite-attapulgite que renferment les marnes et les calcaires lacustres de l'Éocène supérieur et de *l'Oligocène. L'Oligocène supérieur* renferme également une montmorillonite (VAN DER MAREL, 1956 *b*) qui n'a pas été spécialement étudiée dans le cadre de ce travail.

Le tableau 2 rassemble les données stratigraphiques, les faciès locaux et les types d'argiles rencontrés dans le bassin de Mormoiron.

II. — ESSAI D'EXPLICATION

La nature des minéraux argileux a surtout retenu l'attention, par suite de l'existence d'une attapulgite-palygorkiste lacustre pour laquelle l'hypothèse d'une néogenèse a été retenue, bien que les conditions physico-chimiques de formation soient encore très mal connues.

On a, tout d'abord, tenté d'établir un lien entre les sédimentations argileuses tertiaires et l'existence plus ou moins proche de massifs déjà émergés. C'est ainsi que, selon certains observateurs, la présence de bauxites ou de kaolins dépendrait des roches silico-alumineuses des vieux socles hercyniens du centre et du sud-est de la France. Dès lors, sur les calcaires urgoniens émergeant avec l'isthme durancien, se seraient déposés, soit par voie éolienne, soit par voie hydraulique, les matériaux alumineux bauxitiques ou les ocres sableux à kaolin. On peut déjà s'étonner de l'extrême sélectivité de ces divers modes de transport, ne déposant, dans un cas que des matériaux très fins, argileux, et bauxitiques, dans l'autre cas, que des sables grossiers et argileux, à granulométrie bien définie, et essentiellement composés de quartz, de kaolin et d'oxydes ferriques (gœthite).

Bien qu'il existe une controverse permanente, sur l'origine autochtone ou allochtone des bauxites, certaines études ont montré, dans certains cas, que leur parenté minéralogique avec les calcaires du « mur » peut être réelle (HARTHAN, 1955). En ce qui concerne les argiles rouges, dites de décalcification, nous avons pu montrer de même, un exemple de parenté possible, entre de tels matériaux et le calcaire sous-jacent (GUENNELON, 1958).

Quant aux argiles à rapport SiO_2/Al_2O_3 élevé, et magnésiennes, on a admis l'hypothèse du transport d'argiles préformées à partir de roches endogènes du Massif central ou des volcans de la région d'Aix.

L'essentiel de ce mécanisme est donc de n'admettre pour tous ces minéraux argileux (du kaolin aux palygorskites en passant par les montmorillonites et les vermiculites), qu'un processus d'héritage, par suite du soulèvement de socles cristallins et de l'altération lointaine des matériaux volcaniques.

En fait, comme le signale MILLOT (MILLOT, RADIER, BONIFAS, 1957), la néoformation de l'attapulgite ou plus exactement la vraisemblance de cette hypothèse, est étroitement liée aux conditions de sédimentation et aux paléoclimats des continents voisins, et nous ajouterons, à ceux des hinterlands immédiats, dans le cas de la sédimentation lacustre.

Selon la théorie de H. ERHART (1956), les sédiments à kaolin proviendraient de l'action de l'érosion (phase rhexistasique) sur les socles hercyniens latéritisés ; ainsi obtiendrait-on les ocres et les grès et sables bigarrés qui occupent ici le crétacé su-

périeur Aptien. La période suivante serait une phase de pédogenèse latéritique (biostasie) qui permettrait la formations des couches d'attapulgite et des sédiments associés.

En fait, à l'Éocène, l'isthme durancien est constitué et la présence de ces argiles est limitée à des bassins restreints, alors qu'au centre de cet isthme, le miocène est directement transgressif sur les calcaires du Barrémien (Villeneuve-les-Avignon, Avignon, etc.), qui émergent des alluvions récentes. Il paraît excessif de supposer que, s'il a existé des contrées où la latéritisation a pu s'effectuer, le seul résidu actuel de ce phénomène pédogénétique soit constitué de sédiments transportés, ayant d'ailleurs l'extrême homogénéité de composition déjà signalée.

Par contre, l'on remarque que toutes les formations postérieures à l'Aptien et antérieures à la transgression burdigalienne, sont liées à des cuvettes topographiquement restreintes, qu'elles présentent une extension limitée, et des faciès particuliers. De plus, si l'on peut parfois y déceler des formes de dépôt (sédimentation entre-croisée, cordons de galets, etc.) on note également dans les formations à kaolin des niveaux de concrétions, d'accumulation ferro-manganésifère, voire même des cuirasses ferro-manganésifères, qui indiquent non pas des variations sédimentaires, mais de véritables phénomènes de pédogenèse, indifférents à l'orientation des dépôts.

Dès lors, il est facile de relier entre elles les diverses argiles trouvées dans ce bassin, en invoquant seulement l'évolution des matériaux déposés localement, sans faire intervenir de transports à longue distance.

Après le dépôt des marnes à illite de l'Aptien, des sables marins glauconieux de l'Albien et grès à tourmaline, staurotide et andalousite du Cénomanien, (GUENNELON, 1958) commence la lacune stratigraphique qui mène à la fin de l'Éocène inférieur. Durant cette période, une pédogenèse latéritique conduit à la rubéfaction des sables de l'Albien, et, en surface tout au moins, à celle des grès cénomaniens. L'érosion affecte les formations précédentes (phase I), et contribue à déposer des marnes et des argiles bigarrées, des sables, dont le constituant argileux majeur est de la kaolinite, associée à un peu de vermiculite. Ce kaolin provient ici de l'érosion des formations post aptiennes, ayant subi une pédogenèse de type latéritique (phase II). Durant l'Éocène moyen et supérieur, c'est une mer peu profonde, puis un grand lac qui occupe le bassin et les migrations ioniques de SiO_2, CaO, MgO, lessivées par la latéritisation, sont à l'origine de marnes calcaires, d'argiles lie-de-vin (vermiculite), de calcaires lacustres, d'argiles blanches (attapulgite-palygorskite).

Enfin, à l'oligocène, par suite de l'orogenèse des massifs calcaires, le lac se restreint en surface et en profondeur ; la sédimentation chimique s'accentue avec dépôt de calcaires à silex, de marnes vertes (attapulgite de Mormoiron), et de gypse ; l'origine de ce sulfate peut être recherchée dans l'oxydation des sulfures de fer imprégnant les marnes de l'Aptien, un intermédiaire moins oxydé existant sous forme de soufre dans les lignites de l'Éocène inférieur (Méthamis). (Phase III.)

A la fin de cette période, une action tectonique contribue à vider ce lac, les dépôts argilo-sableux, déposés sur les flancs sud du mont Ventoux en formation, sont entraînés et forment le cône de déjection de Crillon-le-Brave.

Enfin, les dépôts argileux de Mormoiron vont s'étaler plus au sud et à La Roque-sur-Pernes, au sud de Malemort, une marne verte du type montmorillonite (VAN DER MAREL, 1956 *a*), remplit les poches à la surface des calcaires lacustres et des gypses.

La transgression burdigalienne intervient alors avec un conglomérat de base et s'étale sur tout l'isthme durancien où elle est en discordance sur le Crétacé moyen du centre de cet isthme.

III. — CONCLUSION

L'inventaire des minéraux argileux que contiennent les sédiments en auréoles du bassin de Mormoiron (Vaucluse), révèle une grande diversité de types. Plus qu'à des évolutions lointaines et à des transports à longue distance, cette diversité semble liée à des conditions de climat, de topographie, et de végétation qui ont contribué à former des argiles kaoliniques sur les formations géologiques émergées. Par suite du lessivage de la silice et des bases alcalino-terreuses, vers une mer bordière, puis vers un lac progressivement réduit, on trouve au centre de cette région des attapulgites, des vermiculites, des calcaires lacustres et des gypses.

La montmorillonite trouvée à La Roque-sur-Pernes, peut avoir bénéficié du même mode de formation. Peut-être aussi est-ce une relicte de sols noirs à montmorillonite, analogues à ceux décrits par EDELMAN (EDELMAN et SCHUFFELEN, 1947), et dont la fraction minérale a subsisté, après érosion et transport éventuel (1).

Ces hypothèses qui utilisent certains aspects de la thèse bio-rhexistasique de H. ERHART, mettent en évidence l'importance des phénomènes pédologiques locaux sur la mise en place de gîtes argileux. Il est évident qu'il est nécessaire de confronter les données de ce bassin avec les bassins analogues de la région d'Apt et peut-être avec le gîte à sépiolite de Salinelles (Gard). D'autre part, il faudra également envisager la nécessité de l'étude des impuretés sableuses, du point de vue minéralogique, que contiennent en faible proportion, il est vrai, les bancs d'argiles, de gypse, de calcaires lacustres et de calcaires à silex.

Les identifications ont été réalisées par l'emploi des Rayons X (Laboratoire de Minéralogie du Muséum d'Histoire naturelle), l'A. T. D., la thermogravimétrie, la mesure de la capacité d'échange, et, pour certains échantillons par des analyses chimiques totales.

Reçu pour publication en mai 1962.

SUMMARY

CLAYS OF THE MORMOIRON BASIN (VAUCLUSE), AND ANCIENT PEDOLOGICAL PROCESSES

The Mormoiron basin (Vaucluse) is situated on the Cretaceous massif of the Provence. It consists of a series of post-Aptian tracts extending up to the oligocene and the Burdigalian transgression. Aptian marls contain illite, while kaolin appears during the Albian, associated with Goethite, persisting until the lower Eocene where it accompanies vermiculite. Vermiculite disappears after the mid-Eocene, and only clays of the palygorskite — type remain.

The presence of kaolin seems to te associated with an autochtonous allitization, while the palygorskites, associated to gypsum and flint, may result by neoformation or by migration of silica and bases, soluble residues of laterite formation.

(1) En fait, lorsqu'il y a montmorillonite relicte du sol, on se trouverait plutôt en présence de beidellite ne présentant qu'une réaction endothermique à 600° et pas de réaction endothermique à 900°.

ZUSAMMENFASSUNG

DIE TONBÖDEN DES MORMOIRONBECKENS (VAUCLUSE) UND DIE FRUHEREN PEDOLOGISCHEN ERSCHEINUNGEN

Das Mormoiron-Becken (Vaucluse) lehnt sich an die provenzalischen Gebirgsketten der Kreidezeit an. Es beträgt eine Reihe von Ringkränzen post-aptischer Böden, die bis zum Oligozän und der burdigalischen Transgression reichen. Während die aptischen Mergel Illite enthalten, erscheint in der albischen Schicht Porzellanerde, verbunden mit Goethit, bis zum unteren Eozän, wo sie die Vermikulit begleitet. Letztere verschwindet nach dem mittleren Eozän und es verbleiben nur noch palygorskitische Tone.

Das Vorhandensein von Porzellanerde scheint an eine einheimische Allitisation gebunden zu sein, während die Palygorskite mit Gips und Kiesel, durch Neubildung und Wanderung der Kieselsäure und der Basen lösliche Endprodukte der laterischen Pedogenese bilden.

Глины бассейна Мормуарона (Воклюз) и древние первообразующие процеѣсы.

Р. ГЕННЕЛОН (Авиньон).

Бассейн Мормуарона опирается на прованские массивы юрскоѳй эпохи. Он состоит из серии поясов почв пост-апциéна, доходящих до олигоцена и до бурдигалийской трансгрессии. Если мергель апциена содержит иллиты, то каолин появляется в альбиене в соединении с гетитом и содержится до нижнего эоцена, где он сопровождает вермикулит. Этот последний исчезает после среднего эоцена и остаются лишь глины типа палигорскитов.

Присутствие каолина как-будто связано с местной аллитизацией, а палигорскиты в соединении с гипсом и кремнем могут происходить через неоформацию от миграции кремнезема и щелочей, растворимых остатков латеритного почвообразования.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BASTISSE, 1947. Contribution à la détermination du type minéralogique des argiles des sédiments. *Ann. Agron.*

EDELMAN, SCHUFFELEN, 1947. On the origine of some clay minerals in soils. *C. R. Conf. Pedol. Medit. Alger-Montpellier,* 108-113.

ERHART H., 1956. La genèse des sols en tant que phénomène géologique. Masson. Edit., Paris.

GRIM, 1953. Clay Mineralogy. Mac Graw Mill Books C°.

GUENNELON R., 1957. Etude d'une poche d'argile rouge en relation avec une roche-mère calcaire. *Bull. A. F. E. S.,* octobre.

GUENNELON R., 1958. Utilisation de techniques minéralogiques pour l'examen des profils de sols. *Bull. A. F. E. S.,* mai.

HARTMAN, 1955. Origine of heavy minerals in Jamaican bauxites. *Econ. Geol. U. S. A.,* **7,** 738-747.

MILLOT G., RADIER H., BONIFAS M., 1957. La sédimentation argileuse à attapulgite et montmorillonite *Bull. Soc. geol. France,* **7,** 425-434.

VAN DER MAREL, 1956 *a.* Quantitative differential thermal analysis of clay and other minerals. *Amer. Mineralogist.,* **41,** 236.

VAN DER MAREL, 1956 *b.* Lettre du 19 octobre 1956.

Ann. agron., 1962, **13** (4), 373-376.

CHRONIQUE DES LIVRES

BOULLARD B., MOREAU R. — SOL, MICROFLORE ET VÉGÉTATION. Paris, Masson, 1962, 168 p.

Les auteurs brossent dans les deux premiers chapitres un tableau général de la population du sol. Ils définissent les facteurs susceptibles de la modifier : climat et saisons, composition du sol, peuplement végétal. Les chapitres suivants sont consacrés aux influences réciproques de la microflore et des végétaux supérieurs. L'étude analytique des différents rapports (saprophytisme, parasitisme ou symbiose) est envisagée à la lumière de nos connaissances actuelles de la biochimie bactérienne et végétale.

Le dernier chapitre est une synthèse des notions exposées au cours de cet ouvrage, les auteurs s'efforçant de replacer les phénomènes dont ils ont analysé les mécanismes dans le complexe constitué par le milieu sol.

H. B.

DHAR N. R. — « NITROGEN PROBLEM ». Presidential address. Forty-eighth Indian Science Congress, Roorkee, 1961. Indian Sci., Congr. Association, 64 Dilkhusa Str., Calcutta 17, 32 p.

L'auteur fait un historique des moyens par lesquels le monde moderne aborde le problème agronomique de l'azote : connaissance de la chimie des composés azotés, découverte des gisements géologiques de minerais azotés, production industrielle des engrais.

Il insiste ensuite sur les limites d'un apport artificiel d'azote minéral dans l'accroissement des rendements des récoltes et le maintien de la fertilité du sol. La productivité et la rentabilité du kilogramme d'azote diminuent aux fortes doses.

La fixation naturelle d'azote atmosphérique par voie biologique ou physico-chimique qui s'accompagne d'une oxydation de carbohydrates, conduit à la formation d'humus, seule base stable de la fertilité. Pour que cette fixation soit efficace, le sol doit être bien pourvu en P, K et Ca.

L'auteur termine en insistant sur la nécessité de l'expérimentation, clé de la prospérité agricole des pays évolués.

Y. P

HINE H. J. — DICTIONARY OF AGRICULTURAL ENGINEERING. Cambridge, Heffer, 1961, 252 p.

Dans ce petit dictionnaire, l'auteur a rassemblé un certain nombre de renseignements, de tables, de formules sur des questions concernant l'équipement et l'outillage agricole. Il le destine aux ingénieurs et aux agriculteurs qui ont journellement à appliquer les formules, les tables de références et de concordance concernant ces questions : par exemple, table de concordance des températures en degrés centigrades et degrés Farenheit : tables de rapport entre différentes unités (bushels et gallons, yard et mile) ; poids des semences de différentes plantes cultivées par bushel, etc.

Une note brève est donnée sur l'évolution de l'outillage mécanique et, quand la chose est possible, l'explication et l'origine du mot anglais concernant la machine ou l'outil sont examinés. Ces notes sur l'évolution peuvent aider, affirme l'auteur, ceux qui s'adonnent aux études d'anthropologie et d'histoire, quand ils ont à établir l'influence du machinisme humain.

Des sujets, comme la physique de l'atmosphère et du sol, sont évoqués, car beaucoup de processus expérimentaux agricoles demandent un climat artificiel ou un retournement du sol.

Les rubriques sont disposées dans l'ordre alphabétique, et en tête de chacune est donnée la traduction des termes en français et allemand. Sous la rubrique « symboles » figure une liste des abréviations de caractère international, relatives aux unités de mesure.

R. F.

HOMÈS M. V. L. — ALIMENTATION MINÉRALE ÉQUILIBRÉE DES VÉGÉTAUX. Wetteren (Belg.), Universa, 1961, 298 p.

Cet ouvrage est le premier d'une série de 3 volumes consacrés à l'alimentation des végétaux. Il traite des principes généraux de l'alimentation équilibrée des végétaux.

La première partie est relative à la théorie de l'alimentation équilibrée des végétaux. Après la présentation des formules algébriques exprimant les connaissances classiques (loi du minimum, formule de MITSCHERLICH) et l'étude de la combinaison des actions individuelles, on aboutit à l'établissement d'une formule générale. Suit un exposé synthétique de la théorie de l'alimentation équilibrée qui ramène le développement végétal à l'action de la concentration des éléments actifs du milieu alimentaire.

La deuxième partie traite des vérifications expérimentales de la théorie précédente. Après des indications sur les modifications des formules théoriques nécessitées par l'expérimentation, de nombreux exemples sont donnés : toxicité des chlorures, relation entre la quantité totale d'éléments dans une formule nutritive et le rendement. Il est montré ensuite, sur de nombreux exemples, que les courbes exprimant une interaction binaire présentent des formes analogues. Détermination de l'optimum nutritif dans le cas de 3 éléments, par utilisation d'un diagramme triangulaire. L'interaction d'un élément indispensable (potassium) avec un élément non indispensable (sodium) est étudiée sur la betterave sucrière.

La dernière partie montre les aspects méthodologiques de la théorie de l'alimentation équilibrée. L'auteur fait d'abord un examen critique des hypothèses implicitement admises dans les diverses méthodes expérimentales. Il critique notamment la méthode d'expérimentation complète du type factoriel et propose une méthode basée sur le seul préalable physiologique de la nécessité des éléments nutritifs. La méthode des variantes systématiques fait l'objet d'une étude à l'aide des théories précédentes.

L'ensemble de l'ouvrage aboutit à la présentation d'un modèle mathématique des réactions de la plante à la composition du milieu nutritif.

R. G.

ORGELS B. — CONTRIBUTION A L'ÉTUDE DES PROBLÈMES AGRICOLES DE LA SYRIE. Correspondance d'Orient, nº 4, Bruxelles, Centre pour l'étude des Problèmes du Monde musulman contemporain, 1962, 107 p., Carte.

L'auteur estime que la place de l'agriculture est prépondérante dans l'économie de la Syrie et pense que ses problèmes sont les premiers à résoudre pour remédier au sous-développement. L'étude qu'il a faite à ce point de vue comprend deux parties : les conditions physiques et humaines de l'agriculture syrienne et une série de petites monographies, où est examinée la situation agricole d'un certain nombre de villages ou d'exploitations dispersés dans diverses régions.

Les données récentes de la météorologie fournissent un fondement sûr pour l'étude du climat, élément essentiel de l'économie syrienne, car c'est lui qui fait les années bonnes ou mauvaises ; l'hydrogéologie permet quelques espoirs, pourtant limités.

L'analyse des forêts et des prairies naturelles, comme celles des sols, montre combien sont complexes les conditions physiques de ce pays situé entre la Méditerranée et le désert.

Les conditions humaines amènent à considérer les aspects sociaux et techniques de l'économie agricole syrienne. La mauvaise répartition des terres y est manifeste et la nécessité d'une réforme s'impose. Mais cette dernière ne suffit pas : elle doit s'intégrer dans une évolution générale de la société et de sa formation intellectuelle et technique. Un chapitre sur l'évolution actuelle révèle la situation précaire de l'agriculture et les solutions tentées.

Les enquêtes menées dans les cadres régionaux montrent combien on retrouve, un peu partout en Syrie, l'exploitation et l'oppression du cultivateur, la pauvreté de la classe paysanne. Elles donnent de nombreux exemples relatifs aux frais de production des cultures et à la productivité du travailleur.

En conclusion, l'auteur signale que la Syrie apparaît, malgré tout, comme privilégiée parmi les pays insuffisamment développés et que de grandes chances s'offrent à elle.

R. F.

PINTA M. — RECHERCHE ET DOSAGE DES ÉLÉMENTS TRACES. Paris, Dunod, 1962, 726 p.

Dans un important ouvrage de 700 pages, accompagné de plus de deux mille références bibliographiques, l'auteur présente un travail de regroupement, de synthèse, de sélection et de critique. Après avoir défini les éléments traces, dans une première partie il indique les méthodes de recherches utilisées, mentionne les procédés d'extraction des éléments traces et oligo-éléments par solubilisation des produits étudiés, envisage leur séparation à l'aide des complexes organiques, par électrochimie, ou par échange d'ions et chromatographie. Il montre combien est important, souvent difficile, le choix d'une technique particulière, adaptée au but précis de l'analyse, puis dans un chapitre consacré à l'interprétation statistique des résultats, il donne les critères permettant de juger de la validité de la technique choisie et de localiser les causes d'erreur.

Dans une seconde partie, les méthodes de dosage sont étudiées, aussi bien du point de vue théorique que pratique. Les problèmes posés sont systématiquement et minutieusement passés en revue, soit par l'étude d'un élément ou d'un groupe d'éléments, soit par l'analyse d'un milieu complexe particulier (roches, sols, plantes, milieux biologiques, métaux, alliages, produits chimiques, etc.). Les applications de la spectrophotométrie d'absorption sont présentées en précisant les techniques particulières à la recherche de chaque élément.

La spectrographie d'émission est traitée dans une troisième partie, d'abord dans ses principes généraux, puis sous différents aspects : les techniques de flamme, d'arc et d'étincelle, avec discussion des possibilités d'application. Dans un chapitre spécial sont exposées les perspectives dès à présent offertes par l'analyse spectrale à lecture directe, où la cellule photoélectrique fait place à la plaque photographique.

L'analyse polarographique fait l'objet de la quatrième partie, avec sélection des méthodes. C'est une technique nouvelle qui convient à l'analyse des éléments traces et oligoéléments.

La cinquième partie donne un aperçu général de quelques autres techniques physico-chimiques : spectrométrie de fluorescence lumineuse et de rayons X, méthodes radiochimiques, pour lesquelles il est donné un principe sommaire accompagné de quelques exemples d'application pratique.

En résumé, cet ouvrage présente un caractère essentiellement pratique, avec les notions théoriques suffisantes pour faire comprendre les résultats expérimentaux.

R. F.

POIREE M., OLLIER Ch. — ASSAINISSEMENT AGRICOLE. DRAINAGE PAR TUYAUX OU FOSSÉS. AMÉNAGEMENTS DES COURS D'EAU ET ÉMISSAIRES. Paris, Eyrolles, 1961, 440 p.

Dans une première partie, les auteurs situent le problème des rapports entre l'eau et le sol. Un premier chapitre traite des propriétés physiques des sols, en rappelant un certain nombre de données classiques : composition et analyse granulométriques, porosité, structure. Un deuxième chapitre traite de « l'eau dans le sol ». A côté d'idées généralement admises et vérifiées, on en trouve d'autres qui sont à l'heure actuelle plus contestables, notamment que « pour *tous les sols*, les taux d'hu-

midité remarquable correspondent aux mêmes valeurs de pF, à savoir que pour le point de rétention (et humidité équivalente) pF = 3 ». Les problèmes de la circulation de l'eau dans le sol sont vus dans l'optique de l'application de la loi de Darcy, et on souligne à juste titre les limites de l'application des formules. On traite également de la saturation de l'eau non saturante et du ruissellement de l'eau en surface. Dans un troisième chapitre, les auteurs parlent du « cycle de l'eau dans la nature ». Les principaux paramètres climatiques sont bien mis en relief et clairement exposés. Le rôle de la nature des sols sur la « répartition des eaux météoriques » est également souligné.

« Les principes et les bases de l'assainissement agricole » sont développés dans une deuxième partie. Les auteurs énumèrent les principaux « inconvénients des sols humides », sans insister peut-être suffisamment sur la conséquence directe la plus importante pour la plante cultivée, à savoir l'asphyxie des racines. Ensuite, ils décrivent les effets de l'assainissement agricole, avec une description des éléments principaux des réseaux (fossés ouverts ou drains enterrés). Puis un chapitre fondamental donne les bases du calcul des réseaux d'assainissement, où une part importante est faite à des données bibliographiques concernant la tolérance des plantes à un excès d'eau temporaire dû à la proximité de la nappe phréatique. Une étude de diverses formules permet de dégager « les principales lois de l'hydraulique applicables en assainissement agricole », et constitue un aide-mémoire pour l'ingénieur.

La troisième partie de ce volume traite de « la technique de l'assainissement agricole ». On y passe en revue l'aménagement des cours d'eau et émissaires, le drainage par fossés, le drainage par tuyaux enterrés, l'exécution et l'entretien des tuyaux d'assainissement. Notons que dans cette partie les auteurs parlent de techniques très nouvelles et probablement promises à une utilisation plus étendue qu'actuellement, comme le drainage taupe muni de la « tuile plastique » ou d'une gaine de béton moulé sur place. Il est certain que ces techniques ont plus d'avenir que le sous-solage en vue du drainage, dont il est question à plusieurs reprises.

Ces critiques de détail ne réduisent pas l'intérêt général d'un livre à jour, comportant de nombreuses données intéressantes, tant sur le plan technique qu'économique. L'ingénieur chargé de la mise en place des travaux y trouvera également des schémas relatifs à la conduite des études et à la réalisation « administrative » des travaux.

Néanmoins, dans le problème central qu'est la conception *technique* du réseau d'assainissement, on assiste à une schématisation excessive du problème. En effet, dans les techniques proposées, toutes sont axées sur l'évacuation de l'eau excédentaire présente sous forme d'une nappe phréatique, plus ou moins profonde. Ceci autorise les auteurs à faire profiter le lecteur d'une expérience étrangère (notamment hollandaise) où réellement c'est une nappe phréatique qui est en cause. Or il est loin d'être démontré qu'en France les terrains à assainir souffrent d'une nappe, permanente ou temporaire. Il nous semble donc injustifié de parler de « l'ignorance des cultivateurs », qui « essaient encore maintenant de pallier les inconvénients de l'humidité en excès par des moyens simples, peu coûteux en apparence, en tout cas peu efficaces et périmés, par exemple en creusant des raies pour l'écoulement des eaux à courte distance et en pratiquant la culture en billons » (p. 139). Les auteurs, qui ne préconisent que les fossés ouverts ou les drains enterrés, remarquent pourtant à juste titre (p. 159) « que les canalisations souterraines... ne captent pas directement les eaux de ruissellement superficiel comme le font les fossés ». Si l'existence du ruissellement et de la stagnation *superficiels* est admise, est-on en droit de considérer les fossés ouverts comme un progrès technique *réel* et *vérifié* sur la culture en billons ?

Après avoir dit (p. 149) que l'ingénieur devra « séparer avec soin les différentes causes (de l'humidité), les classer par ordre d'importance et examiner celles qu'il paraît les plus facile de combattre », on constate que les auteurs n'ont pas tiré toutes les conséquences de cette prise de position judicieuse. Cela réduit malheureusement la partie théorique et pratique de ce livre, qui, à l'échelle de la parcelle, est plus un traité de drainage qu'un traité d'assainissement.

A. F.

ANNALES

AGRONOMIQUES

Vol. 13 - 1962 - n° 5

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

Reproduction, même partielle, interdite sans autorisation des auteurs
et de l'Institut natioual de la Recherche agronomique.

Ann. Agron., 1962, **13** (5), 379-379.

631 416 : 631.811

RÔLE VECTEUR DE DIVERS ANIONS MINÉRAUX OU ORGANIQUES DANS LES PHÉNOMÉNES GÉOCHIMIQUES ET PHYSIOLOGIQUES

5e Mémoire

E. M. BASTISSE

Laboratoire des Sols, Centre national de Recherches agronomiques, Versailles (Seine-et-Oise)

SOMMAIRE

Les composés ferriques du type des chélates apportés directement au sol, sont susceptibles de rester présents dans les solutions du sol pendant une durée de temps suffisamment longue pour permettre de lutter efficacement contre la chlorose ferrique des cultures herbacées ou arbustives.

INTRODUCTION

Dans des travaux antérieurs (Bastisse, 1945-1960 ; 1949 *a*, 1949 *b* ; Demolon et Bastisse 1942, 1944 *a*, 1944 *b*), nous avons étudié les complexes colloïdaux, métalliques électro-négatifs ou neutres que l'on peut obtenir avec tous les métaux et en particulier avec le fer (ferreux ou ferrique). L'agent principal de protection était la silice, qui jouait le rôle de vecteur et maintenait le fer en solution, ce qui permettait d'assurer la nutrition ferrique des végétaux.

Le présent mémoire a pour but :

1° De mettre en comparaison des produits où l'élément fer est complexé par différents protecteurs minéraux ou organiques.

2° D'étudier l'action des lavages successifs de façon à préciser la manière dont se comportent ces produits lorsqu'ils sont ajoutés au sol sous forme de solutions, de pseudo-solutions, de floculats ou de poudres.

3° De voir dans quelles conditions il est possible, grâce à ces produits complexés, d'augmenter la teneur en fer des solutions du sol et de déterminer ceux qui semblent susceptibles de donner les meilleurs résultats.

PROTOCOLE EXPERIMENTAL

Dans 3 séries de 10 bocaux de dimensions appropriées, on introduit les produits ferriques à étudier.

Bocal nº 1 — Témoin ;
— nº 2 — Sulfate ferrique ammoniacal cristallisé
— nº 3 — Pyrophosphate de fer citro-ammoniacal à environ 10 p. 100 de fer ;
— nº 4 — Complexe ferri-silicique en pseudo-solution, préparé comme décrit dans les mémoires antérieurs (1-2-3-4-5-6) ;
— nº 5 — Comple ferri-silicique en pseudo-solution, identique au précédent, floculé par du chlorure de calcium (voir 1-2-3-4-5-6-) ;
— nº 6 — Complexe ferri-sillicique en poudre (voir 1-2-3-4-5-6-) ;
— nº 7 — Célonate de fer en solution à environ 2,5 p. 100 de fer (préparé par le Consortium des produits chimiques et Synthèses de Bezons) ;
— nº 8 — Ferro-Grène (E. D. T. A.) ferro-sodique en poudre à environ 8 p. 100 de fer (préparé par SEPPIC) ;
— nº 9 — Séquestrène (EDDHA) ferro-sodique en poudre à environ 12 p. 100 de fer (préparé par GEIGY) ;
— nº 10. — Chélate de fer en poudre à environ 10,3 p. 100 de fer (préparé par GEYGY).

Les quantités de ces différents produits ferriques ont été après dosages, calculées pour amener dans tous les essais 160 mg de Fe.

Dans tous les bocaux, on ajoute 2 000 cc d'eau ce qui correspond pour tous les produits, totalement solubles, à 2 litres de solution à 80 mg de fer par litre.

Les 3 séries de 10 bocaux sont différenciées comme suit :

La 1re Série A est préparée avec de l'eau distillée ;
La 2e — B est préparée avec de l'eau ordinaire de la ville ;
La 3e — C est préparée également avec de l'eau ordinaire de la ville mais reçoit en plus, par bocal, 200 g de terre de l'horizon B, de la coupe de sol dite de l'Étoile de Choisy (C. N. R. A., Versailles).

Pour les 3 séries, on agite soigneusement et à plusieurs reprises, puis on laisse en contact plusieurs jours, en agitant à différentes reprises.

On laisse déposer et on décante 1 000 cc des liquides clairs surnageants. On complète à nouveau exactement à 2 000 cc en ajoutant 1 000 cc d'eau (eau distillée en série A, et eau ordinaire en séries B et C). On agite à plusieurs reprises et on laisse déposer à nouveau plusieurs jours, et l'on soutire une 2e fois 1000 cc de liquide.

On continuera ainsi de suite les opérations pour soutirer successivement autant de solutions claires de 1000 cc qu'il sera nécessaire pour mener l'expérience à bonne fin.

Les déterminations analytiques dans les solutions ainsi obtenues, et éventuellement dans les dépôts retrouvés en fin d'expérience, ont été faites, pour certaines gravimétriquement, et pour le plus grand nombre colorimétriquement par la méthode à l'ortho-phénanthroline.

RÉSULTATS OBTENUS

Ceux-ci sont présentés en 3 groupes :

1er *Groupe - Bocaux* 1-2-3- *Témoins et produits ferriques minéraux* (*tableau* 1)

Bocaux nº 1 - *Témoin*

Essai A - Eau distillée - colonne 1. — Dans cet essai, théorique on voit que les dilutions successives donnent des concentrations qui décroissent rapidement à tel point que la 7e n'est plus que de l'ordre de 1 mg de fer par litre.

Le poids du métal ainsi décanté pour les 7 premiers prélèvements est égal à 99,22 p. 100 du métal introduit. Dans ces conditions, on peut se permettre de négliger les résultats qui seraient obtenus au-delà de la 7e décantation, pour cet essai et également pour tous les autres réalisés en comparaison avec lui.

TABLEAU I

Teneurs en fer, en mg par litre dans les solutions successivement recueillies

Nos et nature du produit ferrique introduit	1 Témoin			2 Sulfate ferrique amoniacal			3 Pyrophosphate de fer (citro-ammoniacal		
Nature de l'eau utilisée	Titres théoriques des dilutions successives dans l'eau distillée	Eau ordinaire de la ville		Eau distillée	Eau ordinaire de la ville		Eau distillée	Eau ordinaire de la ville	
		seule	+ Terre		seule	+ Terre		seule	+ Terre
Colonnes nos	A 1	B 2	C 3	A 4	B 5	C 6	A 7	B 8	C 9
1re solution	80,000	0,200	0,130	52,800	0,280	0,130	80,000	4,320	0,540
2e —	40,000	0,180	0,050	10,000	0,100	0,050	40,000	0,290	0,060
3e —	20,000	0,170	0,050	2,800	0,080	0,050	20,000	0,260	0,050
4e —	10,000	0,150	0,050	1,000	0,060	0,050	10,000	0,230	0,050
5e —	5,000	0,140	0,050	0,580	0,050	0,050	5,000	0,210	0,050
6e —	2,500	0,130	0,050	0,370	0,050	0,050	2,500	0,190	0,050
7e —	1,250	0,120	0,050	0,270	0,050	0,050	1,250	0,180	0,050
Totaux des quantités de fer en mg	158,750	1,090	0,430	67,820	0,670	0,430	158,750	5,680	0,850
recueillies pour les 7 solutions en indices de comparaison	99,22	0,68	0,27	42,39	0,42	0,27	99,22	3,55	0,53

Essai B - Eau ordinaire de la ville - colonne 2. — Celle-ci contient naturellement un peu de fer qui tend à se déposer au fond des récipients ainsi que nous l'avons déjà signalé (I, 4e Mémoire 1960). Les liquides ainsi décantés voient donc leur titre en fer s'abaisser d'autant plus que le nombre des solutions est plus élevé — le poids du dépôt finalement recueilli, augmente lui aussi, comme nous l'avons signalé (1, 4e Mémoire 1960).

Essai C - Eau ordinaire de la ville + Terre. Colonne 3. — L'apport de terre accélère la mise hors de solution du fer qui se trouvait présent dans cette eau ordinaire à une dose supérieure à l'équilibre qui apparaît finalement stable. Cette dose reste identique, à partir de la 2e solution, pour les décantations successives.

Bocaux n° 2 - Sulfate ferrique ammoniacal cristallisé.

Essai A - Eau distillée - colonne 4. — L'hydrolyse et la précipitation de l'hydrate d'oxyde ferrique dans l'eau distillée se produit dès la 1re solution dont le titre ne représente que 66 p. 100 du titre théorique qu'elle devrait avoir. Ce comportement s'exagère par la suite à tel point que la 2e solution ne contient plus que 25 p. 100 - la 3e solution 14 p. 100 et la 4e solution 10 p. 100 de la quantité de fer qu'elles devraient conserver théoriquement.

Pour l'ensemble des 7 solutions, le fer retrouvé ne représente que 42,39 p. 100 du fer introduit.

Essai B - Eau ordinaire de la ville - seule - colonne 5. — Les sels de calcium présents dans cette eau, et dont les teneurs varient de 100 à 200 mg de CaO par litre, ont pour effet d'exagérer les phénomènes d'hydrolyse et de précipitation d'hydrate ferrique et de le rendre pratiquement total dès la 1re solution. Le titre de celle-ci est à peine supérieur à celui de la 1re solution de cette même eau ordinaire, sans addition de sel de fer.

Pour les solutions suivantes, les titres sont encore plus faibles. Il semble que la présence dans le milieu d'un certain volume de précipité d'hydrate d'oxyde ferrique ait pour effet d'accentuer la mise hors de solution du fer initialement présent dans l'eau ordinaire. La quantité de fer retrouvée pour le total des 7 solutions est finalement plus faible que celle retrouvée dans l'essai témoin correspondant (colonne 2).

Essai C - Eau ordinaire de la ville + terre - colonne 6. — En présence de terre les résultats sont absolument identiques à ceux obtenus dans le témoin correspondant (colonne 3). L'apport de sel de fer sous forme de sulfate ferrique ammoniacal passe totalement inaperçu et ne présente aucun effet.

Bocaux n° 3 -Pyrophosphate de fer citro-ammoniacal.

Essai A - Eau distillée - colonne 7. — Ce produit est entièrement soluble et parfaitement stable dans l'eau distillée, même pour des solutions très étendues.

Les titres obtenus pour les solutions successives sont rigoureusement identiques aux titres théoriques présentés colonne 1.

En ce cas et pour le total des 7 solutions, on retrouve ici également 99,22 p. 100 du fer initialement introduit.

Essai B - Eau ordinaire de la ville - seule - colonne 8. — Les sels de calcium solubles présents dans l'eau ordinaire de la ville produisent ici aussi une précipitation du fer qui n'est pas aussi totale que dans le cas du sulfate ferrique ammoniacal (colonne 5)

mais qui est néanmoins très importante, à tel point que dans la 1re solution on ne retrouve plus que 5,08 p. 100 du fer qu'elle devrait contenir.

Les solutions suivantes présentent des teneurs en fer qui ne sont guère plus élevées que celles observées dans le cas correspondant du Bocal nº 1 témoin - colonne 2.

Pour le total des 7 solutions, on ne retrouve que 3,55 p. 100 du fer initialement introduit.

Essai C - Eau ordinaire de la ville + terre - colonne 9. — L'apport de terre exagère les phénomènes de précipitation du fer. Les solutions obtenues, à part la 1re, ont toutes des titres en fer qui sont identiques à ceux du témoin correspondant (bocal nº 1) et du bocal nº 2 sulfate ferrique ammoniacal.

Le total des 7 solutions ne semble être un peu supérieur que grâce au titre un peu plus élevé observé pour la 1re solution.

2e *Groupe - Bocaux nos* 4-5-6- *complexes ferri-siliciques (tableau 2)*

Bocaux nº 4 - *complexe ferri-silicique pseudo-solution.*

Essai A - Eau distillée - colonne 1. — Ce produit est entièrement soluble (pseudo-soluble) et parfaitement stable dans l'eau distillée même pour des dilutions très étendues. Les titres obtenus pour les solutions successives sont rigoureusement identiques aux titres théoriques présentés au tableau 1, colonne 1.

Pour le total des 7 solutions, nous retrouvons : 99,22 p. 100 du fer initialement introduit.

Essai B - Eau ordinaire de la ville - seule - colonne 2.

Les sels de calcium solubles présents dans l'eau ordinaire agissent peu sur les 1re, 2e et 3e solutions. Par contre, pour la 4e solution, où la concentration théorique devient inférieure à 20 mg de mg par litre, on observe la formation d'un floculat de couleur jaune rouille, constitué par un mélange d'oxyde ferrique et de silice. Ce floculat est surmonté par un liquide qui contient une quantité de fer bien inférieure à celle qu'il devrait théoriquement contenir.

Il y a donc eu ici une « cassure du complexe » provoquée par une concentration en sels de calcium supérieure à celle que pouvait supporter la concentration en fer complexé présente dans le milieu. En ce qui concerne la partie du fer restée en solution, il y a eu élévation du rapport moléculaire SiO_2/Fe_2O_3 aux dépens du produit floculé où ce même rapport se trouve très diminué.

Par rapport aux quantités de fer qui théoriquement devraient être présentes en solution, on retrouve les quantités suivantes (exprimées en pour cent) :

1re solution 99,3 p. 100 ; 2e solution 99,3 p. 100 ; 3e solution 99,3 p. 100 ; 4e solution 8,1 p. 100 ; 5e solution 6,2 p. 100,
et pour le total des 7 solutions, on a 87,72 p. 100.

Essai C - Eau ordinaire de la ville + terre - colonne 3. — L'apport de terre a également exagéré les phénomènes de mise hors de solution par « cassure » du complexe ferri-silicique.

Par rapport aux titres théoriques, on retrouve :

1re solution 46,3 p. 100 ; 2e solution 17,6 p. 100 ; 3e solution 9,7 p. 100 ; 4e solution 9,6 p. 100 et pour le total des 7 solutions, on a 30,07 p. 100

TABLEAU 2

Teneurs en fer, en mg par litre, dans les solutions successivement recueillies

Nos et nature du produit ferrique introduit	4 Complexe ferri-silicique en pseudo-solution			5 Complexe ferri-silicique floculat			6 Complexe ferri-silicique poudre		
Nature de l'eau utilisée	Eau distillée	Eau ordinaire de la ville		Eau distillée	Eau ordinaire de la ville		Eau distillée	Eau ordinaire de la ville	
		seule	+ Terre		seule	+ Terre		seule	+ Terre
Colonnes nos	A 1	B 2	C 3	A 4	B 5	C 6	A 7	B 8	C 9
1re solution	80,000	79,420	37,020	0,250	0,400	0,560	0,600	0,300	0,250
2e —	40,000	39,710	7,040	0,260	0,500	0,440	0,550	0,240	0,200
3e —	20,000	19,860	1,930	0,280	0,500	0,200	0,490	0,200	0,100
4e —	10,000	0,810	0,960	0,320	0,510	0,130	0,450	0,200	0,100
5e —	5,000	0,310	0,580	0,360	0,430	0,110	0,380	0,190	0,090
6e —	2,500	0,220	0,310	0,400	0,330	0,100	0,370	0,180	0,080
7e Solution,	1,250	0,180	0,270	0,400	0,230	0,100	0,330	0,170	0,080
Totaux des quantités de fer en mg	158,750	140,510	48,120	2,270	2,900	1,640	3,170	1,480	0,900
recueillies pour les 7 solutions en indices de comparaison	99,22	87,72	30,07	1,42	1,81	1,02	1,98	0,92	0,560

Bocaux n° 5 - Complexe ferri-silicique pseudo-solution floculée.

Essai A - Eau distillée, colonne 4. — Les quantités de fer retrouvées en solution sont très faibles. En effet, la solution dans l'eau distillée a été floculée par du chlorure de calcium à la dose de 4 g du produit, sec anhydre, pour les 2 litres de solution. L'élimination de ce produit floculant ne peut être réalisée de façon suffisante qu'après plusieurs dilutions successives et il en résulte que le titre en fer des dernières solutions tend à être un peu plus élevé que celui des solutions du début.

Pour les 7 solutions, la quantité totale de fer retrouvé ne preprésente que 1,42 p. 100 du fer initialement introduit.

Essai B - Eau ordinaire de la ville - seule - colonne 5. — Les quantités de fer retrouvées en solution sont très faibles et décroissent avec le nombre des solutions successives.

Pour les 7 solutions, la quantité totale de fer retrouvé ne représente que 1,81 p. 100 du fer initialement introduit.

Essai C - Eau ordinaire de la ville + terre - colonne 6. — L'apport de terre diminue encore les quantités de fer, surtout en solution, principalement à partir de la 3e solution.

Pour les 7 solutions, la quantités de fer retrouvé est nettement plus faible que dans les essais A et B et ne représente que 1,02 p. 100 du fer initialement introduit.

Bocaux n° 6 - Complexe ferri-silicique en poudre.

Essai A - Eau distillée - colonne 7. — Les quantités de fer passant en solution ne sont pas très élevées. Elles décroissent assez régulièrement de la 1re solution à 0, 600 mg Fe par litre, jusqu'à la 7e solution qui n'en contient plus que 0, 330 mg de Fe par litre.

Pour les 7 solutions, le total du fer ainsi retrouvé ne représente que 1,98 p. 100 de la quantité de fer initialement apporté.

Essai B - Eau ordinaire de la ville - seule - colonne 8. — Les quantités de fer passant en solution sont ici sensiblement la moitié de celles obtenues dans l'essai A précédent.

Pour les 7 solutions, le total du fer solubilisé n'atteint que 0,92 p. 100 du fer introduit.

Essai C - Eau ordinaire de la ville × terre - colonne 9. — L'apport de terre diminue encore le titre en fer des solutions qui, cette fois, devient très faible et se rapproche de ce que l'on observe pour un essai de même nature, sans aucun apport de produit ferrique (voir tableau 1, colonne 3).

Pour les 7 solutions, le total du fer solubilisé, n'est plus que de 0,56 p. 100 du fer initialement introduit.

3e *Groupe - Complexes ferri-organiques (tableau 3)*

Bocaux n° 7 — Célonate ;
Bocaux n° 8 — Ferro-Grene ;
Bocaux n° 9 — Séquertrène ;
Bocaux n° 10 — Chélate.

Pour ces 8 complexes ferriques étudiés ensemble.

TABLEAU 3

Teneur en fer, en mg par litre, dans les solutions successivement recueillies

Nos et nature du produit ferrique introduit			7 Célonate de fer en solution		8 Ferro-Grene EDTA ferro-sodique		9 Sequestrène (Geigy) ferro-sodique		10 Chélate de fer (Geigy)	
Nature de l'eau utilisée		Eau distillée	Eau ordinaire de la ville		Eau ordinaire de la ville		Eau ordinaire de la ville		Eau ordinaire de la ville	
Colonnes nos		A 1	seule B 2	+ Terre C 3	seule B 4	+ Terre C 5	seule B 6	+ Terre C 7	seule B 8	+ Terre C 9
1re Solution		80,000	77,720	56,170	72,100	59,260	77,810	64,320	78,120	60,200
2e —		40,000	25,480	18,980	23,200	22,220	27,790	25,210	33,260	26,720
3e —		20,000	12,600	9,110	11,480	10,740	13,600	11,710	16,630	12,380
4e —		10,000	6,110	4,000	5,330	5,180	6,550	5,850	8,320	6,240
5e —		5,000	2,980	2,000	2,540	2,530	3,030	2,780	4,160	3,120
6e —		2,500	1,420	1,150	1,300	1,380	1,530	1,490	2,030	1,800
7e —		1,250	0,760	0,640	0,620	0,700	0,800	0,750	0,990	1,100
Totaux des quantités de fer recueillies pour les 7 solutions	en mg	158,750	127,070	92,050	116,570	102,010	131,110	111,110	143,501	111,560
	en indices de comparaison	99,22	79,42	57,53	72,86	63,76	83,19	69,44	89,69	69,72

Essais A - Eau distillée - colonne 1. — Ces produits sont totalement solubles dans l'eau distillée. Les solutions successives restent parfaitement stables même très étendues et les titres obtenus sont en tous les cas rigoureusement identiques aux titres théoriques présentés antérieurement au tableau 1, colonne 1.

Pour les totaux des 7 solutions, nous retrouvons en tous les cas 99,22 p. 100 du fer initialement introduit.

Essais B - Eau ordinaire de la ville - seule - colonnes 2-4-6-8. — Les sels de calcium présents dans cette eau ont sur ces produits ferriques une certaine action de mise hors de solution. Mais cette action a une allure totalement différente de celle que l'on observe dans le cas du complexe ferri-silicique en pseudo-solution. Elle ressemble pas du tout à une « cassure » brutale des produits. En effet, elles est faible ou modérée pour la 1re solution, puis devient nettement plus forte pour la 2e solution, et semble alors être stabilisée et ne pas devenir plus importante pour les solutions suivantes.

TABLEAU 4

Teneurs en fer dans les solutions successivement recueillies

Résultats présentés en indices de comparaison = 100 (par rapport aux quantités théoriquement présentes)

Bocaux nos Complexes ferri-organiques	7 Célonate	8 Ferro-Grene	9 Séquestrène	10 Chélate
Essais B. Eau ordinaire de la ville, seule				
D'après les teneurs en mg indiquées tableau 3				
Colonnes nos	2	4	6	8
1re solution	97,15	90,12	97,26	97,65
2e solution	63,70	58,00	69,48	83,15
3e solution	63,00	57,40	68,00	83,15
Totaux des 7 solutions	79,42	72,86	83,19	89,69
Essais C. Eau ordinaire de la ville + terre				
D'après les teneurs en mg indiquées tableau 3				
Colonnes nos	3	5	7	9
1re solution	70,21	74,08	80,40	75,25
2e solution	47,45	55,54	63,02	66,80
3e solution	45,55	53,70	58,55	61,90
Totaux des 7 solutions	57,53	63,76	69,44	69,72

C'est ce qui apparaît déjà à l'examen des teneurs en mg par litre, indiquées au tableau 3, colonnes 2-4-6-8. On se rend mieux compte en considérant les indices de comparaison qui correspondent aux pour cent du fer dosé dans chaque solution par rapport aux quantités théoriques que l'on devrait retrouver ainsi que le montre, les chiffres figurant au tableau 4, où nous présentons seulement les résultats les plus intéressants : ceux des 1re-2e-3e solutions et ceux des totaux des 7 solutions.

Nous voyons que des quantités importantes des complexes ferri-organiques passent en solution. Il y a cependant des quantités non négligeables de ces produits qui se déposent au fond des bocaux, et nous que avons pu retrouver et doser en fin d'expérience afin de faire des bilans corrects de nos opérations.

Ceci semble indiquer que ces produits par rapport aux sels solubles que l'on rencontre dans les solutions du sol, présentent une sensibilité qui est différente selon la nature chimique du produit organique avec lequel on a réalisé ces complexes.

Essai C - Eau ordinaire de la ville + terre - colonnes 3-5-7-9-. — L'apport de terre a eu pour effet d'exagérer ces résultats et d'abaisser encore les quantités de fer restant présentes en solution pour chacune des dilutions successives obtenues et évidemment pour les totaux des quantités de fer retrouvées pour les 7 solutions, ainsi que le montrent (tableau 3) les teneurs en mg et (tableau 4) les indices de comparaison correspondants.

Malgré cela, on voit que les résultats obtenus avec ces produits complexes ferri-organiques sont tous de beaucoup supérieurs à ceux que nous avons pu constater pour les autres produits étudiés aux groupes 1 et 2.

CONCLUSIONS

On peut augmenter de façon très sensible la quantité de fer restant présente dans les solutions du sol en y ajoutant des produits pouvant constituer une réserve de fer assimilable pour les végétaux.

Le présent mémoire nous montre que les produits les plus efficaces sont ceux du type des complexes ferri-organiques étudiés au groupe 3 tels que les produits :

n° 7 — Le célonate de fer ;
n° 8 — Le ferro-Grene ;
n° 9 — Le séquertrène ;
n° 10 — Le chélate de fer ;

qui tous donnent des résultats de beaucoup supérieurs aux autres produits mis en comparaison avec eux.

Il est permis de penser que l'industrie pourra nous apporter des produits d'une efficacité croissante, ce qui permettrait d'apporter une solution au délicat problème de la lutte contre la chlorose des végétaux.

Il reste à espérer que les questions de prix ne limitent pas l'emploi de ces produits efficaces.

Reçu pour publication en mai 1962

SUMMARY

THE ROLE OF DIFFERENT MINERAL OR ORGANIC ANIONS AS CARRIERS IN GEOCHEMICAL AND PHYSIOLOGICAL PROCESSES

Ferric compounds of a chelate type, when directly applied to the soil, are likely to remain in the soil solution long enough to provide an efficient control of the iron chlorosis of plants.

ZUSAMMENFASSUNG

VEKTORIELLE ROLLE VERSCHIEDENER MINERALISCHER UND ORGANISCHER ANIONEN IN DEN GEOCHEMISCHEN UND PHYSIOLOGISCHEN ERSCHEINUNGEN.

Die eisenjaltigen Verbindungen vom Chelatentypus, die direkt dem Boden zugeführt werden, können während einer Zeitspanne in den Bodenlösungen verbleiben, die lange genug ist, um wirksam die Eisen-Chlorose zu bekämpfen.

О роли различных минеральных или органических анионов как переносчиков в геологических и физиологических явлениях.

Е. М. БАСТИСС — (Лаборатория почв — Версаль).

Сложные соединения железа — типа хелатов, принесенные прямо на поверхность почвы, способны оставаться в почвенных растворах в течении времени достаточно продолжительного, чтобы позволить успешную борьбу с хлорозом растений.

RÉFÈRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Bastisse E. M., 1945-1960. Rôle vecteur de divers anions minéraux ou organiques dans les phénomènes géochimiques et physiologiques. *Ann. agron.*, 1er mémoire, 1945, 30-57 ; 2e mémoire, 1945, p. 434-446 ; 3e mémoire, 1946, 73-77 ; 4e mémoire, 1960, 441-467.

2. Bastisse E. M., 1949 *a*. Essais sur le rôle des complexes colloïdaux métalliques électro-négatifs en Pédologie et en Physiologie végétale. Thèse de doctorat d'ingénieur, présenté le 29 avril 1949 à la Faculté des Sciences de Paris.

3. Bastisse E. M., 1949 *b*. Nouvelles preuves de l'état complexe du fer dans les eaux de drainage. *C. R. Acad. Sci.*, **229**, 521-522.

4. Demolon A., Bastisse E. M., 1942. Sur la présence de complexes pseudo-solubles dans les eaux de drainage. *C. R. Acad. Sci.*, **215**, 188-190.

5. Demolon A., Bastisse E. M., 1944 *a*. Rôle de la silice dans la nutrition ferrique des végétaux. *C. R. Acad. Sci.*, **219**, 293-295.

6. Demolon A., Bastisse E. M., 1944 *b*. Rôle vecteur de la silice dans les phénomènes géochimiques et physiologiques. *Ann. agron.*, 265-297.

Ann. Agron., 1962, **13** (5), 391-468

631.46 (213)

CONTRIBUTION A L'ÉTUDE DE LA DYNAMIQUE MICROBIENNE DES SOLS EN ZONE SEMI-ARIDE ET EN ZONE TROPICALE SÈCHE

DEUXIÈME PARTIE

Y. DOMMERGUES
Centre de Pédologie de l'O. R. S. T. O. M., Hann-Dakar (Sénégal)

CHAPITRE IV

CYCLE DU CARBONE

On classe, en général, les substances ternaires en quatre groupes « compte tenu de leur solubilité à laquelle est liée souvent la vitesse de décomposition dans le sol » (99) :

a) substances très solubles : glucides simples, acides organiques ;
b) substances peu solubles : hémicelluloses ;
c) substances insolubles : amidon, cellulose, lipides, cires et résines ;
d) la lignine bien connue pour sa grande résistance aux agents biologiques.

Parmi les différents corps que l'on pouvait tester aux faibles humidités, nous n'en avons retenu que quatre, caractérisés par des vitesses de décomposition dans le sol de plus en plus faibles. Ce sont : le glucose, l'amidon, la cellulose et la carboxyméthylcellulose que nous étudierons successivement.

Les échantillons de sol ont donc été enrichis avec ces substances hydrocarbonées auxquelles on a toujours ajouté de l'azote minéral de façon à ramener le rapport C /N au voisinage de 20. Bien entendu, les seuils correspondants ont été comparés aux seuils du carbone organique préexistant dans le sol.

De même que dans le cas du cycle de l'azote, on a, pour le cycle du carbone, déterminé à la fois des seuils de démarrage et des seuils de disparition.

Pour la détermination des seuils, on s'est adressé à des méthodes basées sur des principes aussi différents que la respirométrie, les numérations microbiennes, la disparition de l'hydrate de carbone incorporé, etc.

Le dégagement potentiel de CO_2 des sols présente un intérêt indiscutable car il semble entièrement dû à des activités biologiques (99, 120). Bien que la respirométrie apporte peu de renseignements sur l'activité des divers groupes de microorganismes présents, « cette technique offre l'avantage d'utiliser le milieu écologique global » (12). On l'a adoptée ici comme méthode de référence ; mais son application aux analyses de très grandes séries n'est pas toujours facile de sorte que, sauf exception, elle n'a été

appliquée seulement qu'à quelques-uns des sols récoltés pour cette étude. On a alors dû choisir des échantillons représentant des groupes pédologiques à caractéristiques biologiques très différentes, c'est-à-dire :

— *d'une part des sols à niveau d'activité biologique très bas*, caractérisés par un dégagement potentiel de CO_2 très faible (inférieur à 15 mg CO_2/100 g de sol/7 jours), le plus typique étant le sol faiblement ferrallitique sur sables DR.

— *d'autre part des sols caractérisés par l'exubérance relative de leur microflore* et par un dégagement potentiel de CO_2 moyen à élevé (supérieur à 40 mg CO_2/100 g de sol/7 jours), les plus typiques étant les sols d'argile noire tropicale, par exemple les sols TH et PT. Sont à rapprocher dans ce dernier groupe, les sols hydromorphes typiques, par exemple le sol SOR-130.

On a appliqué à toute la gamme de sols récoltés les méthodes se prêtant bien aux analyses de grandes séries, telles que les méthodes basées sur la disparition du substrat carboné (glucose ou amidon) ou la méthode d'apparition des colonies sur papier filtre (cellulolyse).

A. — Aperçu de la cinétique des processus de minéralisation du carbone dans le sol

1. — *Cas du glucose*

La disparition du glucose en fonction du temps a été suivie, à la fois dans le cas d'une argile noire tropicale (TH) et dans celui d'un sol faiblement ferrallitique (DR).

Les sols ont été enrichis en glucose et en sels minéraux aux doses suivantes exprimées en mg pour 100 g de sol :

Glucose	200 mg
Nitrate de potassium	30 mg
Mélange minéral SI	6 mg
Carbonate de calcium précipité	40 mg

ce qui correspond à un apport de 0,2 p. 100 de glucose.

Le dosage du glucose a été effectué, après extraction à l'eau à 80°C, suivant la technique d'Issekutz-Both (18).

Les courbes de teneur du sol en glucose en fonction du temps montrent que la dégradation de ce corps est encore très rapide aux pF élevés, même dans le cas du sol DR biologiquement peu actif. Au pF 4,9 dans le sol TH et au pF 4,7 dans le sol DR, il suffit de 48 heures pour que la glucolyse soit totale (figure 6).

2. — *Cas de l'amidon et de la cellulose*

L'évolution, en fonction du temps et du pF, des processus de dégradation de l'amidon, de la cellulose et du carbone organique préexistant naturellement dans le sol, a été suivie par la *méthode respirométrique*, suivant la technique indiquée ci-dessous.

Le sol d'argile noire tropicale utilisé ici (PT-61) a été enrichi, soit en amidon, soit en cellulose, aux doses suivantes exprimées en mg pour 100 g de sol :

a) *Enrichissement en amidon :*

Amidon soluble	500 mg
Nitrate de potassium	75 mg
Mélange minéral SI	15 mg
Carbonate de calcium précipité	100 mg

b) *Enrichissement en cellulose :*

La formule d'enrichissement diffère de la précédente seulement par le fait qu'on a remplacé l'amidon soluble par de la cellulose en poudre pour chromatographie Durieux apportée à la même dose.

La technique de dosage décrite ailleurs (35) a dû être modifiée. Dans la méthode originale, chaque échantillon de 100 mg de sol convenablement humidifié est mis dans un bocal de 1 litre à fermeture canette hermétique, dans lequel on place un bécher de 100 ml contenant la solution de soude titrée destinée à fixer le CO_2 dégagé pendant l'incubation. Or cette façon de procéder, dans le cas des faibles humidités, conduirait à modifier l'humidité des échantillons puisqu'il s'établirait un équilibre entre le sol et la solution de soude. Aussi a-t-on eu recours à l'artifice qui consiste à remplacer le bécher par un pèse-filtre, dont le couvercle rodé n'est soulevé que quatre heures avant la fin de l'expérience, grâce à deux ficelles passant sous le joint du couvercle du bocal sans nuire à l'étanchéité.

Sur la figure 4, le graphique supérieur correspond au dégagement cumulé de CO_2 du sol non enrichi ; le graphique du milieu correspond à la dégradation de l'amidon et celui du bas à la dégradation de la cellulose. Pour ces deux derniers corps, on a déduit du dégagement global de CO_2, le dégagement du témoin enrichi seulement en éléments minéraux (nitrate de potassium, mélange minéral SI et carbonate de calcium).

Les résultats ont déjà été analysés sommairement au chapitre I, par. E, ci-dessus. On signalera ici plus particulièrement les différences de comportement existant entre les substances métabolisables :

— la dégradation de l'amidon, très rapide en début d'incubation, ralentit très nettement dès la fin de la première semaine ;

— la vitesse de dégradation de la cellulose est, à pF égal, beaucoup plus faible mais n'a, par contre, pas tendance à diminuer aussi nettement par la suite.

B. — Dégradation du glucose

Comme le glucose est une substance très facilement métabolisable, les seuils de démarrage et de disparition sont pratiquement identiques. Il est donc indifférent de déterminer l'un ou l'autre seuil. C'est pourquoi nous avons opté pour la manipulation se prêtant le mieux à l'expérimentation de série ; dans ce cas particulier, c'est incontestablement celle qui consiste à mesurer le seuil de disparition.

On a toutefois également calculé, à titre de référence, les seuils déterminés avec la méthode respirométrique.

1. — *Seuils de démarrage de la glucolyse déterminés par la méthode respirométrique*

La technique expérimentale est celle qui a été décrite au paragraphe A ci-dessus, la durée d'incubation ayant été fixée à une et deux semaines. Les seuils de démarrage de la glucolyse se situent aux pF 5,4 ou 5,5 quelles que soient les durées d'incubation adoptées (tableau 26).

TABLEAU 26

Comparaison des seuils de glucolyse, d'amylolyse, de cellulolyse, de carboxyméthylcellulolyse et de dégradation du carbone organique du sol, déterminés par la méthode respirométrique avec une et deux semaines d'incubation.

Nature du seuil	Sol d'argile noire (TH – T)		Sol faiblement ferrallitique (DR)	
	1 semaine	2 semaines	1 semaine	2 semaines
Glucolyse	5,4	5,4	5,4	5,5
Amylolyse	5,1	5,2	5,0	5,2
Cellulolyse	4,3	4,5	$2,7 < S < 4,0$	4,2
Carboxyméthylcellulolyse	$2,7 < S < 3,7$	3,9	$S < 2,7$	$2,7 < S < 4,0$
Dégradation du carbone organique du sol	5,2	5,0	4,8	5,0

2. — *Seuils de disparition du glucose déterminés par la technique d'humidification directe*

a) *Technique expérimentale.*

L'enrichissement adopté a déjà été décrit au paragraphe A ci-dessus. En ce qui concerne la durée d'incubation, elle a été déduite d'une expérience préliminaire synthétisée par la figure 3, d'où il résulte que la pente de la courbe de disparition complète du glucose en fonction du temps est très faible dès la première semaine pour les sols biologiquement actifs. Mais il faut attendre la quatrième semaine, pour que cette courbe devienne asymptotique, dans le cas des sols du type DR. Aussi a-t-on fixé uniformément à quatre semaines la durée d'incubation après laquelle tous les échantillons sont soumis à un test qualitatif du glucose. L'humidité la plus faible, pour laquelle il y a eu disparition totale de ce corps, correspond au seuil de disparition.

TABLEAU 27

Seuils de disparition du glucose en quatre semaines.

Type de sol	Référence	H %	pF
Sol brun subaride	BB	3,0	5,4
	BR	0,5	5,5
Sol ferrugineux tropical non ou peu lessivé	TV	0,8	5,3
	DIOR	0,5	5,3
Sol ferrugineux tropical lessivé	DH	1,0	5,3
	SOR-10	1,1	5,2
Sol ferrallitique	DR	0,7	5,3
	SF	1,3	5,3
	KA	8,8	5,0
Sol d'argile noire	TH	6,9	5,3
	PT	4,9	5,2
	PT-61	4,8	5,4
	BAN	5,0	5,4
Sol hydromorphe typique	KB	5,7	5,2
	SOR-130	2,3	5,3

b) *Résultats :*

Les déterminations effectuées sur quinze sols, appartenant à six types pédologiques différents, montrent que le *seuil de disparition du glucose est très nettement stabilisé autour du pF* 5,3, avec pour valeurs extrêmes 5,0 et 5,5 (tableau 27).

Pour la glucolyse, le niveau du seuil est donc indépendant du type de sol ; ceci s'explique bien par le fait qu'il existe toujours, même dans les sols biologiquement les plus pauvres, des germes susceptibles de dégrader rapidement le glucose.

3. — *Seuils de disparition du glucose déterminés par la technique d'humidification indirecte*

Cette technique consiste, ainsi qu'on l'a vu, à mettre en équilibre des échantillons de sol dans des exsiccateurs où l'humidité relative est maintenue constante par des solutions saturées.

a) *Technique expérimentale :*

Trois lots de sol ont été mis en équilibre 14 jours dans deux exsiccateurs : l'un contenant une solution saturée de chlorure de potassium (humidité relative de 84 p. 100), l'autre une solution saturée de phosphate monoammonique (humidité relative de 92 p. 100). Tous les échantillons ont été ensuite enrichis dans les conditions précisées au paragraphe A ci-dessus. Après quatre semaines d'incubation, chaque échantillon a été soumis à un dosage qualitatif du glucose.

b) *Résultats :*

Il n'y a eu disparition du glucose que dans les exsiccateurs où l'humidité relative était de 92 p. 100. On en conclut que le seuil de disparition du glucose se situe, pour les trois sols étudiés, entre le pF 5,4 (correspondant à l'humidité relative de 84 p. 100) et le pF 5,1 (correspondant à l'humidité relative de 92 p. 100). Ces résultats confirment parfaitement ceux qui ont été obtenus par la méthode d'humidification directe (tableau 28).

TABLEAU 28

Disparition du glucose en quatre semaines dans un sol en équilibre avec une atmosphère d'humidité relative fixe.

Type de sol	Référence	Humidité relative de l'atmosphère	pF du sol	Présence de glucose
Sol d'argile noire tropicale	TH	84 %	5,4	+
		92 %	5,1	0
	PT	84 %	5,4	+
		92 %	5,1	0
Sol ferrugineux tropical lessivé	DH	84 %	5,4	+
		92 %	5,1	0

4. — *Besoins minima en eau de la microflore responsable de la dégradation du glucose*

Les caractéristiques écologiques de la microflore glucolytique classent ce groupement physiologique parmi les moins exigeants en eau. On doit le rapprocher à ce point de vue de la microflore responsable de l'ammonification des feuilles d'Arachide (chapitre III, par. F) et de la microflore minéralisant le glycérophosphate (chapitre VI, par. B).

C. — Dégradation de l'amidon

1. — *Seuils de démarrage de l'amylolyse déterminés par la méthode respirométrique*

La technique expérimentale est toujours celle qui a été décrite au par. A ci-dessus, la durée d'incubation ayant été fixée à une et deux semaines.

Les seuils de démarrage de l'amylolyse ainsi déterminés pour les sols DR et TH, se situent au pF 5,0-5,1 pour l'incubation d'une semaine, et au pF 5,2 pour l'incubation de deux semaines (tableau 29).

TABLEAU 29

Détermination des seuils d'amylolyse par cinq méthodes différentes.

Méthodes	Durée d'incubation en semaines	Sol faiblement ferrallitique DR	Sols d'argile noire tropicale	
			TH	PT
Méthodes directes				
Respirométrie	1	5,0	5,1	—
Respirométrie	2	5,2	5,2	—
Numération des Bactéries	1	4,9	4,9	5,0
Numération des Champignons	1	5,5	5,2	5,3
Disparition de l'amidon	4	5,2	5,1	5,0
Méthodes indirectes				
Immobilisation de l'azote minéral.	2	4,7	5,3	—
Variations du pH	1	4,8	5,2	4,7

2. — *Seuils de démarrage de l'amylolyse déterminés par la méthode de numération*

Pour déterminer les seuils de prolifération de la microflore amylolytique, la gamme d'échantillons de sol portés à des pF décroissant de 5,7 environ (état sec à l'air) à 4,2 environ a été enrichie en amidon suivant la formule écrite au paragraphe A ci-dessus. Après une semaine d'incubation, les échantillons ainsi traités ont subi une numération réalisée à partir de suspensions-dilutions, dont la première a porté sur la totalité de chacun d'entre eux, immédiatement à la sortie de l'étuve, c'est-à-dire *sans aucun dessèchement préalable*. On a, en effet, vérifié que, si le dessèchement est sans inconvénient grave dans le cas des numérations d'*Azotobacter* ou même de germes cellulolytiques, il est inadmissible dans la plupart des autres cas, car il entraîne une diminution considérable de la densité des microorganismes vivants. La numération a

été faite sur le *sodium albumenate agar* de WAKSMAN (64, 107), les lectures ayant lieu le cinquième jour. On a dénombré ainsi les microorganismes à croissance rapide intervenant dans la dégradation de l'amidon. Il s'agit essentiellement de Bactéries et d'Actinomycètes. Ici encore, les expériences n'ont porté que sur un nombre limité de sols choisis pour la diversité de leurs caractéristiques biologiques. Il ressort du tableau 29 que les seuils de prolifération de la microflore bactérienne totale se situent entre les pF 4,9 et 5,0.

On verra que, par la suite, il s'est avéré nécessaire de compléter les numérations de Bactéries par des numérations de Champignons. Ces dernières ont mis en évidence des seuils de prolifération compris entre 5,2 et 5,5 (tableau 40). L'interprétation de ces résultats sera donnée au chapitre VIII.

3. — *Seuils de démarrage de l'amylolyse déterminés par la méthode indirecte d'immobilisation de l'azote minéral*

Cette méthode qu'on examinera ultérieurement en détail, consiste à étudier l'immobilisation de l'azote minéral du sol par différentes substances hydrocarbonées dont l'amidon. Appliquée au sol d'argile noire TH, elle met en évidence, pour une incubation de deux semaines, une valeur du seuil égale à 5,3 ; le sol DR qui n'est pas doté d'une microflore à croissance aussi rapide, est caractérisé par un seuil nettement plus bas : 4,7 (tableau 29).

4. — *Seuils de disparition de l'amidon*

L'enrichissement utilisé est toujours celui qui a été décrit au paragraphe A ci-dessus. La durée d'incubation a été déterminée, compte tenu des résultats d'une expérience préliminaire synthétisée par la figure 3, d'où il résulte que la courbe de disparition complète de l'amidon devient nettement asymptotique dès la quatrième semaine, même pour des sols biologiquement peu actifs du type DR.

TABLEAU 30

Seuils de disparition de l'amidon en quatre semaines

Type de sol	Référence	H %	pF
Sol brun subaride	BB	3,8	5,0
	BR	0,7	5,0
Sol ferrugineux tropical non ou peu lessivé	TV	0,9	5,1
	DIOR	0,9	4,7
Sol ferrugineux tropical lessivé	DH	1,1	5,1
	SOR-10	1,4	4,9
Sol ferrallitique	DR	0,8	5,2
	SF	2,2	4,9
	KA	11,7	4,6
Sol d'argile noire	TH	7,5	5,1
	PT	5,4	5,0
	PT-61	5,6	5,2
	BAN	6,4	5,0
Sol hydromorphe typique	KB	8,8	4,7
	SOR-130	3,5	5,0

Les déterminations effectuées sur quinze sols appartenant à six types pédologiques différents, montrent que *les seuils de disparition de l'amidon sont stabilisés autour du pF* 5,0 avec pour valeurs extrêmes 4,6 et 5,2 (tableau 30). Bien que la dispersion des résultats soit plus élevée que dans le cas de la glucolyse (tableau 27), on peut considérer que le niveau du seuil de disparition de l'amidon à 4 semaines est peu sensible au type de sol.

5. — *Variations du pH au cours des processus d'amylolyse*

L'expérience montre que les processus d'amylolyse dans le sol entraînent une élévation souvent importante du pH. On pourrait songer à utiliser ce phénomène pour déterminer un seuil d'amylolyse. Mais les valeurs apparaissent comme plus dispersées que celles obtenues par la méthode directe (tableau 29).

6. — *Comparaison des différentes méthodes de détermination des seuils d'amylolyse dans le sol*

Bien que cette comparaison n'ait porté que sur trois sols (tableau 29), on peut estimer qu'il existe une concordance assez satisfaisante entre les méthodes respirométrique et de numération. Les méthodes indirectes basées sur les phénomènes d'immobilisation et les variations du pH semblent être moins sûres.

7. — *Besoins minima en eau de la microflore amylolytique*

On a vu que les différentes méthodes concouraient à démontrer que le seuil de l'amylolyse est situé aux environs du pF 5,0.

L'amidon se rencontrant très fréquemment, et souvent en abondance, dans les résidus végétaux, on doit admettre que, dans un sol en place, la dégradation de ces résidus peut encore se poursuivre jusqu'à une humidité très faible correspondant approximativement au pF 5,0.

D. — Dégradation de la cellulose

La cellulose constitue la source majeure de carbone dans le sol et sa dégradation est inconstestablement « l'un des phénomènes les plus importants de l'agronomie et de la vie du sol en général » (99). De même que pour la mesure des seuils de démarrage de glucolyse et d'amylolyse, on a adopté ici des durées d'incubation d'une et deux semaines. Mais les valeurs déterminées après l'incubation courte (une semaine) n'ont été données qu'à titre indicatif, car elles correspondent à des seuils non encore suffisamment stabilisés (chapitre I, par. F). Par contre, les valeurs relatives à l'incubation de deux semaines doivent être considérées comme les valeurs de référence.

1. — *Seuils de démarrage de la cellulolyse déterminés par la méthode respirométrique*

L'enrichissement en cellulose et sels minéraux a déjà été décrit au paragraphe A ci-dessus. La technique expérimentale a été exactement celle qu'on a utilisée pour l'amidon, la durée d'incubation ayant été également fixée à une et deux semaines.

Les seuils de démarrage de la cellulolyse ainsi déterminés se situent, dans le cas du sol DR, à un pF compris entre 4,0 et 2,7 pour l'incubation d'une semaine, et au

pF 4,2 pour deux semaines. Dans le cas du sol TH, caractérisé par une cellulolyse plus active, ces seuils sont décalés vers les pF relativement plus élevés, puisqu'ils sont respectivement de 4,3 et 4,5 (tableau 31).

2. — *Seuils de démarrage de la cellulolyse déterminés par la méthode de numération*

La technique adoptée a été basée sur le même principe que celle décrite au chapitre II pour la détermination du seuil de prolifération des *Azotobacter*. Cette technique a consisté à préparer des gammes d'échantillons de sol à des pF décroissant de 5,7 environ (sol sec à l'air) à 4,0. Ces échantillons ont été ensuite enrichis en poudre de cellulose et en sels minéraux, suivant la formule décrite au paragraphe A ci-dessus, puis mis à l'incubation pendant deux semaines.

Les microcolonies de germes cellulolytiques ont été dénombrées, après séchage, sur plaques de silico-gel ensemencées par saupoudrage (33).

Les seuils ainsi déterminés pour les trois sols DR, TH, PT, sont respectivement 4,5-4,5-4,4 (tableau 31).

TABLEAU 31

Détermination des seuils de cellulolyse par quatre méthodes différentes.

Méthodes	Durée d'incubation en semaines	Sol faiblement ferrallitique DR	Sols d'argile noire tropicale	
			TH	PT
Respirométrie	1	$2,7 < S < 4,0$	4,3	—
Respirométrie	2	4,2	4,5	—
Numération	2	4,5	4,5	4,4
Papier-filtre	1	4,3	4,5	4,3
Papier-filtre	2	4,5	4,5	4,5
Immobilisation de l'azote minéral	2	4,2	4,5	—

3. — *Seuils de démarrage de la cellulolyse déterminés par la méthode du papier filtre*

a) *Technique expérimentale :*

Les échantillons de sol humidifiés ont été mis en contact avec des disques de papier-filtre convenablement imprégnés de substances minérales, placés dans le fond de fioles de Fourneau. On a observé, après une et deux semaines d'incubation, à travers le fond de chaque fiole, l'apparition des colonies de germes cellulolytiques sur le papier-filtre et l'on a fait le dosage de l'humidité sur les échantillons de sol les moins humides où il y a eu développement de colonies visibles à l'œil nu.

b) *Résultats :*

Il ressort du tableau 32, qui groupe les résultats relatifs à quinze sols différents, que le *seuil d'apparition de la cellulolyse se situe aux environs du pF 4,3 pour l'incubation d'une semaine et aux environs de pF 4,5 pour l'incubation de deux semaines.*

Les résultats sont bien groupés autour de ces valeurs moyennes, surtout dans le cas de l'incubation de deux semaines. On peut donc admettre que ce dernier test est pratiquement indépendant du type de sol.

4. — *Seuils de démarrage de la cellulolyse déterminés par la méthode indirecte*

La méthode indirecte dont le principe a été brièvement exposé au paragraphe ci-dessus pour l'amylolyse, est applicable à l'étude de la cellulolyse. Pour les sols D et TH, elle a mis en évidence des seuils ayant respectivement pour valeur 4,2 et 4,5.

Les quatre méthodes de détermination du seuil concordent de façon satisfaisante notamment dans le cas des argiles noires tropicales (tableau 31). De ces mesures, on peut déduire que *la cellulolyse est caractérisée par un seuil situé généralement entre les*

TABLEAU 32

Seuils d'apparition des colonies cellulolytiques après une et deux semaines d'incubation.

Type de sol	Référence	Incubation d'une semaine		Incubation de deux semaines	
		H %	pF	H %	pF
Sol brun subaride	BB	4,9	4,5	4,7	4,6
	BR	1,1	4,4	1,0	4,5
Sol ferrugineux tropical non ou peu lessivé	TV	1,5	4,3	1,4	4,5
	DIOR	1,5	3,5	1,2	4,1
Sol ferrugineux tropical lessivé	DH	1,8	4,2	1,7	4,4
	SOR-10	2,4	4,3	2,3	4,5
Sol ferrallitique	DR	1,6	4,3	1,4	4,5
	SF	3,9	4,2	3,6	4,4
	KA	12,6	4,5	12,0	4,6
Sol d'argile noire	TH	10,2	4,5	10,0	4,5
	PT	7,4	4,3	6,8	4,5
	PT-61	8,4	4,5	7,8	4,6
	BAN	9,6	4,2	8,4	4,5
Sol hydromorphe typique	KB	10,6	4,4	10,3	4,5
	SOR-130	5,2	4,4	4,8	4,5

pF 4,2 et 4,5. Les germes cellulolytiques constituent donc un groupement dont les exigences en eau sont très voisines, tout en étant légèrement inférieures, à celles des végétaux supérieurs.

E. — Dégradation de la carboxyméthylcellulose

Les carboxyméthylcelluloses appartiennent à la classe des éthers de la cellulose. La formule de ces corps est la suivante :

$$(C_6H_9O_5)\ n\ (CH_2COONa)\ m$$

dans laquelle le rapport m/n représente le degré de substitution qui peut être modifié assez facilement.

La dégradation des carboxyméthylcelluloses dans le sol est d'autant plus rapide que leur degré de substitution est plus faible (99). Aussi, a-t-on fait appel à une carboxyméthylcellulose à degré de substitution assez faible (0,7) : il s'agit du produit vendu sous le nom commercial de Blanose R 190 dont la teneur en matière active est de 92 p. 100 [1].

Pour les raisons déjà exposées au paragraphe précédent, les valeurs des seuils correspondant à l'incubation d'une semaine n'ont été données qu'à titre indicatif.

1. — *Seuils de démarrage de la carboxyméthylcellulolyse déterminés par la méthode respirométrique*

a) *Technique expérimentale.*

L'enrichissement en carboxyméthylcellulose et en sels minéraux a été effectuée aux doses suivantes exprimées en mg pour 100 g de sol :

Carboxyméthylcellulose de sodium (Blanose R 190)	500 mg
Nitrate de potassium	75 mg
Mélange minéral SI	15 mg
Carbonate de calcium précipité	100 mg

ce qui correspond à un apport de 0,5 p. 100 de carboxyméthylcellulose et à un rapport C/N de 20.

Le dosage du CO_2 dégagé a été effectué suivant la technique décrite au paragraphe A ci-dessus.

b) *Résultats.*

Dans le cas du sol DR, le seuil de démarrage de la carboxyméthylcellulolyse ainsi déterminé se situe à un pF inférieur à 2,7 pour l'incubation d'une semaine, et à un pF compris entre 4,0 et 2,7 pour l'incubation de deux semaines. Dans le cas du sol TH, le premier seuil est compris entre 3,7 et 2,7 et le deuxième est de 3,7 (tableau 26).

2. — *Seuils de démarrage de la carboxyméthylcellulolyse déterminés par la méthode de numération*

a) *Technique expérimentale.*

L'enrichissement des échantillons de sol est le même que celui qui a été décrit ci-dessus, mais l'apport de carbonate de calcium a été multiplié par 10, car des expériences préliminaires avaient mis en évidence l'influence favorable de doses de carbonate de calcium de l'ordre de 1 p. 100 sur la densité des microorganismes responsables de la carboxyméthylcellulolyse. La numération a été effectuée suivant la technique décrite au paragraphe C ci-dessus pour l'amylolyse, mais en utilisant un milieu à base de carboxyméthylcellulose tel qu'on l'a décrit récemment (38). Les comptages ont été effectués au bout d'une, deux et trois semaines.

b) *Résultats.*

Les seuils déterminés pour deux sols d'argile noire correspondent à des humidités très élevées.

[1] Ces caractéristiques nous ont été aimablement communiquées par les Établissements Novacel à Paris qui fabriquent ce produit.

Dans le cas du sol BAN, on n'a pu mettre en évidence un seuil significatif que pour les germes à croissance lente (trois semaines), ce seuil s'établissant aux environs du pF 3,7.

En ce qui concerne le sol TH, on a constaté qu'aux pF supérieurs à 2,7, il n'existe pas de seuil pour les germes à croissance rapide (une semaine). Par contre, on a pu déterminer le niveau des seuils intéressant les microorganismes à crois sance intermédiaire (2 semaines) et lente (3 semaines) qui sont respectivement de 3,9 et de 3,7.

Ces deux expériences permettent de conclure que, dans les argiles noires tropicales, la carboxyméthylcellulolyse est le fait de microorganismes à croissance lente ou assez lente et très nettement hygrophiles, puisque leurs seuils se situent au voisinage des pF 3,7 et 3,9.

F. — Dégradation du carbone organique préexistant naturellement dans le sol

Les protocoles expérimentaux appliqués ici ne diffèrent des précédents que par le fait que les échantillons de sol n'ont reçu aucun apport de substances énergétiques, ni de sels minéraux.

La technique de mesure du dégagement de CO_2 est celle qui a été décrite au paragraphe A ci-dessus. Les seuils ainsi déterminés s'échelonnent entre les pF 4,3 et 5,2 pour les 10 sols étudiés qui appartiennent à 5 types pédologiques différents (tableau 33). La dispersion des résultats, bien que moins importante que celle qui caractérise la minéralisation de l'azote dans les sols non enrichis, s'explique également par la diversité des caractéristiques chimiques et biologiques des types pédologiques.

Il est possible de distinguer :

a) *des sols à seuil de minéralisation du carbone élevé* (compris entre 4,2 et 4,9). Ce sont :

— les sols ferrugineux tropicaux non ou peu lessivés TV et DIOR ;

— le sol ferrallitique DR qui, par beaucoup de caractères biologiques, se rapproche des sols ferrugineux tropicaux non ou peu lessivés TV et DIOR.

TABLEAU 33

Seuils de minéralisation du carbone organique déterminés par la méthode respirométrique dans des échantillons de sol non enrichis.

Type de sol	Référence	Seuil
Sol ferrugineux tropical non ou peu lessivé	TV	4,3
	DIOR	4,6
Sol ferrugineux tropical lessivé	DH	5,2
	SOR-10	5,1
Sol ferrallitique	DR	4,8
	SF	5,2
	KA	4,9
Sol d'argile noire tropicale	TH	5,2
	BAN	4,9
Sol hydromorphe typique	SOR-130	5,0

b) *des sols à seuil de minéralisation du carbone très élevé* (égal ou supérieur à 4,9). Ce sont :

— les sols ferrugineux tropicaux lessivés DH et SOR-10 ;
— les sols d'argile noire tropicale TH et BAN ;
— le sol hydromorphe typique SOR-130.

Alors qu'on avait défini, pour le cycle de l'azote, des sols à azote organique hygrominéralisable et des sols à azote organique xérominéralisable, on distingue ici :

a) *des sols à carbone organique xérominéralisable* ;
b) *des sols à carbone organique hyperxérominéralisable.*

G. — Comparaison des seuils de dégradation de différentes substances hydrocarbonées dans le sol

Il résulte des expériences décrites ci-dessus que les seuils de dégradation dans le sol des différentes substances hydrocarbonées essayées ici se classent dans l'ordre suivant :

	pF	Tension en atmosphères
a) Seuils de dégradation du glucose	5,0-5,5	100-316
b) Seuils de dégradation de l'amidon	4,6-5,2	40-158
c) Seuils de dégradation du carbone organique hyperxérominéralisable	4,9-5,2	79-158
d) Seuils de dégradation du carbone organique xérominéralisable	4,3-4,9	20-79
e) Seuils de dégradation de la cellulose	4,2-4,5	16-30
f) Seuils de dégradation de la carboxyméthylcellulose	< 4,0	< 10

CHAPITRE V

CYCLE DU SOUFRE

Dans le sol, les transformations des composés soufrés sont, pour une grande part, le fait des microorganismes. Certains dégradent les composés soufrés organiques, libérant le soufre sous forme inorganique. D'autres oxydent ou réduisent les composés soufrés inorganiques (66, 112, 113). Sans nous préoccuper des étapes intermédiaires et complexes entre ces différentes formes du soufre, nous examinerons seulement ici les produits finaux des réactions biologiques. C'est en se basant uniquement sur la forme du soufre s'accumulant ainsi dans le sol que nous distinguerons les deux fonctions : sulfoxydation et sulfhydrisation.

Par sulfoxydation, nous entendons la transformation à l'état de sulfates du soufre minéral ou du soufre organique.

Par sulfhydrisation, nous entendons la tranformation à l'état de sulfures du soufre minéral ou du soufre organique.

Les produits d'enrichissement utilisés ici ont été, en ce qui concerne le soufre minéral : le soufre sublimé ; en ce qui concerne le soufre organique : la l-cystine.

Le soufre peut, en pratique agricole, être apporté au sol sous forme de soufre élémentaire. Il y est relativement vite oxydé par un grand nombre de microorganismes (113). En ce qui concerne la l-cystine, elle a été utilisée au laboratoire par différents chercheurs dont STARKEY (113), FREDERICK et coll. (48), de BARJAC (7). On observe alors une décomposition rapide aboutissant au terme sulfate.

Les méthodes de détermination des seuils ont été basées sur l'emploi de tests semi-quantitatifs destinés à mettre en évidence l'apparition de sulfates ou de sulfures et sur l'emploi de numérations microbiennes. Parallèlement à ces méthodes directes, on a utilisé accessoirement deux méthodes indirectes basées sur les variations de pH et de conductivité.

A. — APERÇU DE LA CINÉTIQUE DES PROCESSUS DE SULFOXYDATION ET DE SULFHYDRISATION DANS LE SOL

1. — *Cinétique de la sulfoxydation*

La sulfoxydation, comme la nitrification, est un phénomène relativement lent puisqu'il demande, pour se manifester avec netteté aux humidités élevées, un délai de l'ordre de trois semaines. Aux pF supérieurs à 4,2, on n'observe un démarrage significatif de la sulfoxydation qu'à partir de la quatrième semaine. Il a été, en conséquence, nécessaire d'adopter pour l'étude de la sulfoxydation une durée plus longue que dans le cas des autres processus. Il a semblé prudent de la fixer à six semaines pour tous les protocoles expérimentaux.

2. — *Cinétique de la sulfhydrisation*

La sulfhydrisation est un phénomène beaucoup plus rapide que la sulfoxydation. C'est ce qui découle de l'examen du tableau 34 mettant en relief une apparition des sulfures plus précoce que celle des sulfates.

TABLEAU 34

Détermination du temps d'incubation nécessaire à l'apparition des sulfates et des sulfures dans un sol ferrugineux tropical lessivé (DH-S) maintenu au pF 4,2 avec et sans apport d'azide de sodium.

Traitement du sol	Apparition des sulfates après une incubation de : semaines				Apparition des sulfures après une incubation de : semaines			
	0	2	3	4	0	2	4	6
Témoin non enrichi	0	0	0	0	0	0	0	0
Apport de soufre sublimé (0,20 %) ...	0	+	++	+++	0	+++	+++	+++
Apport de soufre sublimé (0,20 %) et d'azide de sodium (0,20 %)	0	0	0	0	0	0	0	0
Apport de *l*-cystine (0,37 %)	0	0	+++	+++	0	+++	+++	+++
Apport de *l*-cystine (0,37 %) et d'azide de sodium (0,20 %)	0	0	0	0	0	++	++	+++

Une incubation de deux semaines pourrait donc suffire pour l'étude expérimentale de la sulfhydrisation aux faibles humidités. Toutefois, pour réduire les manipulations, les mesures des seuils de sulfhydrisation ont été jumelées avec les mesures des seuils de sulfoxydation. Le temps d'incubation a donc été le même dans les deux cas, soit six semaines. Cette durée d'incubation n'a pas semblé présenter d'inconvénient pour la mise en évidence des seuils de sulfhydrisation.

B. — Sulfoxydation du soufre élémentaire et de la cystine

1. — *Nature biologique du phénomène de sulfoxydation aux faibles humidités*

La nature biologique de la sulfoxydation est bien connue. Nous avons toutefois tenu à vérifier si, dans les conditions expérimentales où nous nous étions placé, le phénomène était bien dû à des germes vivants. Une première expérience portant sur un sol d'argile noire tropicale (PT-61) a montré qu'un antiseptique (toluène) apporté à la dose de 2 p. 100 empêche effectivement la formation de sulfates dans un sol enrichi préalablement en soufre sublimé. Il en est de même si, au lieu d'un antiseptique, on effectue une stérilisation à l'autoclave. Une stérilisation à température peu élevée (110°C) suffit d'ailleurs car les germes sulfoxydants sont très fragiles. Cette observation est à rapprocher de celle de Starkey : cet auteur a en effet remarqué que la sécheresse seule suffit à entraîner la mort du *Thiobacillus thiooxidans* dans le sol (112). Une autre expérience a permis de contrôler l'effet inhibiteur de l'azide de sodium

sur la sulfoxydation (tableau 34). Une dernière preuve de la nature biologique de la sulfoxydation réside dans le fait qu'on a pu observer parallèlement à l'augmentation de la teneur du sol en sulfates, un accroissement considérable de la densité des micro-organismes sulfoxydants.

2. — *Techniques d'enrichissement*

a) *Enrichissement en soufre élémentaire.*

Pour le soufre élémentaire, on a adopté le dose d'enrichissement de 0,2 p. 100, préconisée par MOSER et OLSON dans des expériences du même type, ou une dose deux fois plus faible (92).

De même que la nitrification, la sulfoxydation n'est vraiment active que si l'on procède à un enrichissement complémentaire en carbonate de calcium à la dose de 1 p. 100 (tableau 10). L'inhibition de certains microorganismes sulfoxydants dans les sols dépourvus de carbonate de calcium est bien connue. Elle a été signalée en particulier par WIKLANDER et HART (54). Mais elle n'a pas encore reçu d'explication satisfaisante. Quoi qu'il en soit, on a procédé à l'adjonction systématique de carbonate de calcium dans tous les essais.

Lorsqu'on a fait appel *aux méthodes directes*, l'enrichissement a été effectué aux doses suivantes exprimées en mg par 100 g de sol :

Soufre sublimé	100 mg
Mélange minéral SO	3 mg
Nitrate d'ammonium	20 mg
Carbonate de calcium précipité	1 000 mg

ce qui correspond à un apport de 0,1 p. 100 de soufre élémentaire et de 1 p. 100 de carbonate de calcium. Le mélange minéral SO ne diffère du mélange minéral SI, décrit au chapitre I paragraphe D, que par l'absence de soufre.

Lorsqu'on a fait appel *aux méthodes indirectes*, basées sur les variations du pH ou de la conductivité, l'enrichissement a été effectué uniquement avec du soufre sublimé apporté à la dose de 0,2 p. 100.

b) *Enrichissement en l-cystine.*

Nous avons remarqué que la dose de 0,374 p. 100 de l-cystine, correspondant à un apport de soufre de 0,1 p. 100, donnait des résultats très satisfaisants. Cette dose est un peu plus élevée que celle utilisée par FRÉDERICK et coll., dans leur étude sur la dégradation de composés organiques soufrés dans le sol (48). Ces auteurs n'ont, en effet, apporté que 0,267 p. 100 de l-cystine ; mais l'ordre de grandeur est le même.

L'enrichissement a été effectué aux doses suivantes exprimées en mg pour 100 g de sol :

l-cystine	374 mg
Mélange minéral SO	3 mg
Carbonate de calcium précipité	1 000 mg

ce qui correspond à un apport de 0,1 p. 100 de soufre organique et de 1 p. 100 de carbonate de calcium.

3. — *Techniques de mesure de l'activité sulfoxydante du sol*

Pour suivre l'évolution des phénomènes de sulfoxydation, on a utilisé quatre méthodes dont deux méthodes directes (dosage semi-quantitatif des sulfates et numération des germes sulfoxydants) et deux méthodes indirectes (mesure des variations du pH et de la conductivité).

a) *Dosage semi-quantitatif des sulfates.*

Ce dosage, inspiré de la méthode MORGAN, consiste à détecter les sulfates du sol dans un extrait aqueux au 1/5 (74). La réaction classique au chlorure de baryum permet de classer les sols suivant leur teneur en sulfates. On a distingué les quatre niveaux suivants :

0 absence de sulfates ;
+ présence de sulfates en faible quantité ;
++ présence de sulfates en quantité moyenne ;
+++ présence de sulfates en grande abondance.

Ce test est peu sensible puisqu'il ne permet de déceler que les sulfates présents à des doses supérieures à 20 p.p.m. exprimées en S. On n'a jamais mis en évidence, par cette méthode, la présence de sulfates dans les échantillons étudiés ici, lorsque ceux-ci n'avaient reçu aucun enrichissement préalable.

On a admis arbitrairement qu'il y avait augmentation significative de la teneur du sol en sulfates dès que le test indiquait leur présence en quantité égale ou supérieure à celle qui vient d'être qualifiée de moyenne, ce qui correspond approximativement à 50 p.p.m. de sulfates exprimés en S.

b) *Numération des microorganismes sulfoxydants.*

La numération des microorganismes sulfoxydants a été faite sur un milieu liquide dérivé de celui que STARKEY a mis au point pour le *Thiobacillus thiooxidans* (1). Après inoculation, les tubes ont été mis en incubation pendant trois semaines en position inclinée, comme le conseille HART (54).

c) *Variations du pH.*

L'oxydation du soufre (apporté seul à la dose de 0,2 p. 100) entraîne une baisse du pH qu'il est facile de mesurer. Malheureusement cette méthode n'est pas applicable à tous les sols.

(1) Formule du milieu liquide utilisé pour la numération des microorganismes sulfoxydants :

Nitrate d'ammonium	2 g
Carbonate de calcium	5 g
Soufre sublimé	10 g
Solution minérale OS2	30 ml
Eau distillée q.s.p.	1 000 ml

composition de la solution minérale OS2 :

Phosphate monopotassique	10,000 g
Phosphate disodique	3,000 g
Chlorure de magnésium	1,000 g
Chlorure de manganèse	0,020 g
Molybdate de sodium	0,001 g
Chlorure ferrique en solution (densité 1,26)	0,4 ml
Eau distillée q.s.p.	1 000 ml

d) *Variations de la conductivité*

L'oxydation du soufre (apporté seul à la dose de 0,2 p. 100) a pour effet d'accroître la concentration du sol en électrolytes (sulfates), d'où une augmentation de la conductivité que l'on mesure, sur extrait aqueux au 1/5, suivant la technique classique du laboratoire de Riverside (116).

4. — *Résultats*

a) *Seuils de sulfoxydation du soufre élémentaire.*

Le tableau 35 montre que ces seuils, déterminés pour 14 sols par le test semi-quantitatif d'apparition des sulfates, sont relativement bien stabilisés autour du pF moyen 4,7, avec pour valeurs extrêmes 4,4 et 5,1.

TABLEAU 35

Seuils de sulfoxydation et de sulfhydrisation.

Type de sol	Référence	Sulfoxydation		Sulfhydrisation	
		Soufre élémentaire	*l*-cystine	Soufre élémentaire	*l*-cystine
Sol brun subaride	BB	4,4	4,6	4,7	5,6
	BR	4,6	4,5	5,0	5,0
Sol ferrugineux tropical non ou peu lessivé	TV	4,5	4,8	4,8	5,5
	DIOR	4,5	4,5	4,4	5,0
Sol ferrugineux tropical lessivé	DH	4,8	5,0	4,8	5,5
	SOR-10	4,6	—	4,7	4,9
Sol ferrallitique	DR	4,6	4,7	4,7	4,9
	SF	4,9	—	4,8	—
	KA	5,0	—	4,6	—
Sol d'argile noire	TH	4,9	4,8	5,1	5,1
	PT	4,5	4,9	4,9	5,1
	BAN	5,1	5,0	5,1	5,3
Sol hydromorphe typique	KB	5,0	—	4,9	—
	SOR-130	5,1	—	5,0	—

Les méthodes indirectes, basées sur les variations du pH et de conductivité, donnent des résultats en général plus faibles, la concordance n'étant vraiment satisfaisante que pour les sols d'argile noire (tableau 36 et figure 17).

b) *Seuils de sulfoxydation de la l-cystine.*

Les seuils de sulfoxydation de la l-cystine, déterminés par le test semi-quantitatif d'apparition des sulfates, sont stabilisés, comme dans le cas du soufre, autour du pF moyen 4,7, avec pour valeurs extrêmes 4,5 et 5,0 (tableau 35).

La méthode de numération donne des résultats plus faibles, mais cependant très nettement supérieurs au pF 4,2, sauf dans le cas du sol DR qui semble être caractérisé par une microflore sulfoxydante nettement moins active et moins xéro-

phile que celles des autres sols étudiés ici (tableau 36). L'explication du décalage, entre les valeurs des seuils déterminés par la méthode de numération et par le test des sulfates, réside d'une part dans le fait que l'erreur expérimentale est considérable,

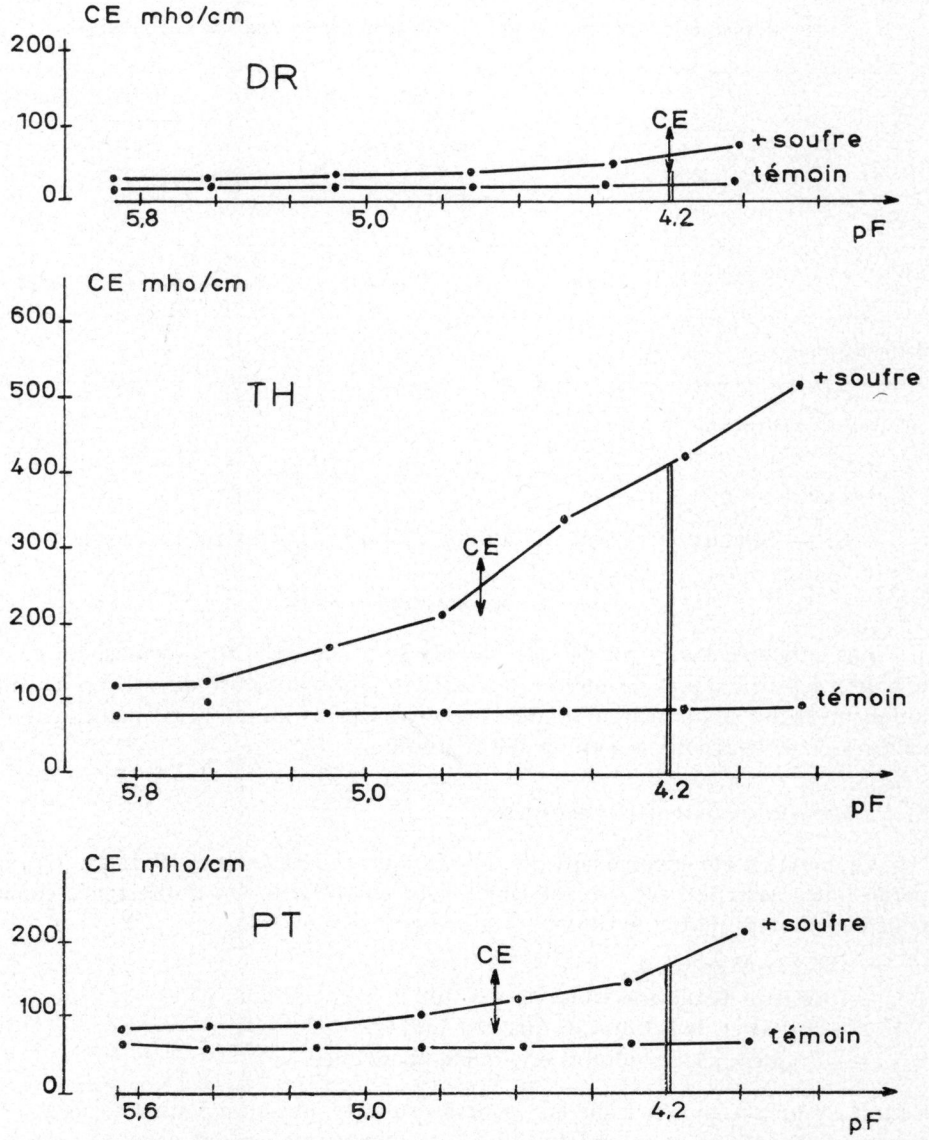


FIG. 17. — *Influence du pF sur l'évolution de la conductivité électrique du sol résultant du développement des processus de sulfoxydation. Les lettres CE indiquent l'emplacement des seuils de variation de conductivité électrique. De haut en bas : sol faiblement ferrallitique DR et sols d'argile noire tropicale TH et PT.*

dans le cas des numérations de germes sulfoxydants, d'autre part, dans le fait, caractéristique de toutes les techniques de numération, que le réveil de l'activité physiologique précède la prolifération microbienne.

Les méthodes indirectes n'ont pas été appliquées dans le cas de la sulfoxydation de la l-cystine.

TABLEAU 36

Comparaison de différentes méthodes de détermination du seuil de sulfoxydation.

Type de sol	Référence	Méthodes directes			Méthodes indirectes	
		Dosage sulfates		Numérat.	pH	Conduct.
		Soufre élém.	l-cystine	l-cystine	Soufre élém.	Soufre élém.
Sol ferrugineux tropical non lessivé	DIOR	4,5	4,5	—	4,6	4,7
Sol ferrallitique	DR	4,6	4,7	4,1	4,5	4,2
	KA	5,0	—	—	—	—
Sol d'argile noire tropicale	TH	4,9	4,8	4,5	4,6	4,7
	PT	4,6	4,9	—	4,5	4,7
	BAN-61	5,1	5,0	4,4	—	—

C. — Sulfhydrisation du soufre élémentaire et de la cystine

1. — *Technique expérimentale*

Les enrichissements ont déjà été décrits au paragraphe B, ci-dessus. En ce qui concerne les techniques de mesure de l'activité sulfhydrisante du sol, on a utilisé uniquement les deux méthodes directes suivantes : dosage semi-quantitatif des sulfures et numération des germes sulfhydrisants.

a) *Dosage semi-quantitatif des sulfures.*

Ce dosage a été effectué suivant la technique de Neckers et Walker (93), qui permet de classer les sols suivant leur teneur en sulfures. On a distingué, comme pour les sulfates, quatre niveaux :

o absence de sulfures ;
+ présence de sulfures en faible quantité ;
++ présence de sulfures en quantité moyenne ;
+++ présence de sulfures en grande abondance.

Ce test est un peu plus sensible que celui des sulfates, puisqu'il permet de déceler des teneurs de l'ordre de 10 p.p.m. de sulfures, teneurs exprimées en S. On n'a jamais mis en évidence, par cette méthode, la présence de sulfures dans les échantillons de sol étudiés ici, lorsque ceux-ci n'avaient reçu aucun enrichissement préalable.

On a admis arbitrairement qu'il y avait augmentation significative de la teneur du sol en sulfures, dès que le test indiquait leur présence en quantité égale ou supérieure à celle qui correspond à la qualification « grande abondance » dans l'échelle adoptée ici. Ce seuil est approximativement de 50 p.p.m. de sulfures exprimés en S.

b) *Numération des microorganismes sulfhydrisants.*

La numération des microorganismes sulfhydrisants a été faite sur un milieu liquide dont la formule est inspirée de celui de POCHON et de BARJAC (7) mais présente l'avantage, sur celui-ci, de ne nécessiter aucune désaération préalable des tubes. On ne reviendra pas ici sur sa composition qui a été publiée récemment (38).

Les lectures aux cinquième, huitième et vingt et unième jours ont permis de dénombrer séparément les microorganismes présentant des vitesses de croissance différentes.

2. — *Résultats*

a) *Seuils de sulfhydrisation du soufre élémentaire.*

Le tableau 35 montre que ces seuils, déterminés pour 14 sols par le test semi-quantitatif d'apparition des sulfures, sont bien stabilisés autour du pF moyen 4,8, avec pour valeurs extrêmes 4,7 et 5,1.

b) *Seuils de sulfhydrisation de la l-cystine.*

Les seuils de sulfhydrisation de la l-cystine, déterminés par le test semi-quantitatif d'apparition des sulfures, sont sensiblement plus élevés que ceux qui caractérisent le soufre élémentaire. Ils sont en moyenne de 5,2 avec pour valeurs extrêmes 4,9 et 5,6, soit près de 4/10 d'unité pF de plus (tableau 35).

Les résultats donnés par la méthode de numération ne concordent absolument pas avec les résultats obtenus par le test d'apparition des sulfures. En effet, pour les trois sols soumis à cette analyse, les seuils observés ont tous été très inférieurs au pF 4,0, qu'il s'agisse de microorganismes à croissance lente ou rapide. Cette non-concordance entre les résultats des deux méthodes s'explique par le fait que le milieu de numération utilisé ici convient au développement de germes semi-anaérobies ou anaérobies ne proliférant dans les sols que pendant les phases d'hydromorphie; mais il ne permet pas le développement des microorganismes responsables de la sulfhydrisation aux faibles humidités

D. — COMPARAISON DES SEUILS DE SULFOXYDATION ET DE SULFHYDRISATION

Les seuils de sulfoxydation se situent au voisinage du pF 4,7, qu'il s'agisse de la sulfoxydation du soufre élémentaire (soufre sublimé) ou du soufre organique l-cystine.

Les seuils de sulfhydrisation du soufre élémentaire se situent sensiblement au même pF, soit 4,8. Par contre, les seuils de sulfhydrisation du soufre organique sont nettement décalés vers les faibles humidités puisqu'ils sont en moyenne de 5,2 et atteignent même exceptionnellement 5,6 (sol BB).

Ce décalage s'expliquerait par le fait que la sulfhydrisation du soufre élémentaire devrait être précédée obligatoirement par sa sulfoxydation qui réglerait donc le niveau du seuil, tandis que, dans le cas du soufre organique, la sulfhydrisation précèderait la sulfoxydation. Cette hypothèse a été confirmée par une expérience basée sur l'effet inhibiteur de l'azide de sodium sur la sulfoxydation (tableau 34). Dans les échantillons enrichis en soufre élémentaire, si la sulfoxydation n'est pas inhibée par l'azide de sodium la sulfhydrisation se manifeste très nettement; par conte, en prrésence d'azide de sodium, il n'y a pas sulfhydrisation. Dans les échantillons enrichis en soufre organique

(l-cystine) l'apport d'azide de sodium n'inhibe pas la sulfhydrisation car la cystine peut peut se dégrader directement sous forme de sulfures sans passer par le stade sulfates.

La sulfoxydation qui, pour le cycle du soufre, est l'homologue de la nitrification pour le cycle de l'azote, apparaît donc à des pF bien supérieurs à ceux qui caractérisent la nitrification. Pour certains sols pourvus d'une microflore sulfoxydante xérophile, ce seuil s'élève jusqu'à 5,0. On peut, dans ce cas, concevoir facilement que, pendant la saison sèche, un sol, en équilibre avec une atmosphère caractérisée par un degré hygrométrique de 93 p. 100 à 95 p. 100, puisse être le siège de processus de sulfoxydation importants. On explique ainsi l'observation de MOSER et OLSON, signalée dans l'introduction, relative à l'oxydation du soufre dans des sols secs à l'air à la station d'expérimentation agricole de l'Orégon (92).

En ce qui concerne l'apparition des sulfures aux faibles humidités, on doit admettre qu'il s'agit là d'un phénomène normal qui n'est obligatoirement pas lié au développement de conditions particulièrement anaérobies.

CHAPITRE VI

CYCLE DU PHOSPHORE

Comme une fraction importante du phosphore d'un sol peut se trouver sous forme organique, l'étude de sa minéralisation présente un intérêt indiscutable. Ne pouvant examiner dans le cadre de ce travail la minéralisation du phosphore d'une façon aussi détaillée que celle de l'azote, nous nous sommes bornés à étudier la minéralisation du glycérophosphate de sodium. Ce corps a déjà été utilisé par PICCI, cité par POCHON et de BARJAC, dans des expériences du même type (99).

Des essais ont été effectués parallèlement avec de la lécithine, substance également employée par PICCI ; mais il n'a pas été possible, dans les conditions expérimentales où nous nous trouvions placé, de mettre en évidence une augmentation significative du phosphore assimilable dans le sol. Il est vraisemblable, qu'aux faibles humidités, la minéralisation de la lécithine est relativement faible et que le phosphore minéral ainsi libéré est en grande partie réutilisé par les microorganismes et donc impossible à déceler par les méthodes analytiques appliquées ici.

La minéralisation du phosphore organique préexistant n'a pu être mis en évidence, en raison de la très faible teneur en cet élément des sols d'Afrique Occidentale étudiés.

Par *phosphore minéralisé*, nous entendons le phosphore libéré par voie microbiologique sous une forme « assimilable » au sens de la méthode TRUOG, c'est-à-dire extractible par une solution d'acide sulfurique 0,002 N (115).

Les résultats ont été exprimés en pourcentage du phosphore minéralisé par rapport au phosphore incorporé sous forme de glycérophosphate de sodium. Ce pourcentage a souvent dépassé 70 p. 100 et même 80 p. 100 dans nos expériences.

A. — APERÇU DE LA CINÉTIQUE DES PROCESSUS DE MINÉRALISATION DU GLYCÉROPHOSPHATE

L'évolution de la minéralisation du phosphore en fonction du temps a été suivie à différentes humidités, dans un sol d'argile noire tropicale BAN, enrichi comme il sera indiqué au paragraphe B ci-dessous. Les dosages ont été effectués aux 3e 7e, 14e et 28e jours. Il ressort de la figure 5 qu'aux pF élevés la minéralisation du phosphore croît avec le temps d'incubation, tandis qu'aux pF moyens et surtout au pF 2,7, la courbe de minéralisation présente, dès les premier jours d'incubation, un maximum suivi d'une phase de décroissance. L'allure des courbes cinétiques de minéralisation du phosphore en fonction du pF du sol rappelle celle des courbes de minéralisation de la tyrosine ou de la caséine (figures 10 et 11). On en donnera une explication au chapitre X.

Comme ces courbes ne peuvent, en raison de leur variabilité liée à l'humidité du sol, guider pour le choix d'une durée d'incubation particulière, celle-ci a été fixée arbitrairement à 14 jours. On a remarqué, en effet, que le glycérophosphate était caractérisé par une minéralisation rapide, même aux pF relativement élevés.

B. — Seuils de minéralisation du glycérophosphate

1. — *Technique expérimentale*

L'enrichissement des échantillons a été effectué aux doses suivantes exprimées en mg pour 100 g de sol :

Glycérophosphate de sodium	816 mg
Sulfate d'ammoniaque	192 mg
Carbonate de calcium précipité	1 000 mg

ce qui correspond à un apport approximatif de 800 p.p.m. de phosphore exprimé en P.

Après l'incubation de 14 jours, le phosphore assimilable, extrait par le réactif de Truog, a été dosé par la méthode colorimétrique au vanado-molybdate de Fleury et Leclerc (47).

2. — *Résultats*

Les résultats des expériences qui ont porté sur 14 sols, sont groupés dans le tableau 37 d'où il résulte que les seuils de minéralisation du glycérophosphate sont toujours supérieurs au pF 5,1. Ils se situent en moyenne au niveau du pF 5,5, avec pour valeurs extrêmes 5,1 et 5,6.

TABLEAU 37

Seuils de minéralisation du glycérophosphate après une incubation de deux semaines.

Type de sol	Référence	Seuils		Pourcentage du glycérophosphate minéralisé au pF 5,0
		pF	Tension en atmosphères	
Sol brun subaride	BB	5,1	125	20 %
	BR	5,6	398	60 %
Sol ferrugineux tropical non ou peu lessivé	TV	5,7	501	76 %
	DIOR	5,7	501	54 %
Sol ferrugineux tropical lessivé	DH	5,6	398	87 %
	SOR-10	5,5	316	64 %
Sol ferrallitique	DR	5,6	398	56 %
	SF	5,5	316	64 %
	KA	5,7	501	44 %
Sol d'argile noire tropicale	TH	5,2	158	43 %
	PT	5,6	398	85 %
	PT-61	5,5	316	36 %
Sol hydromorphe typique	KB	5,5	316	54 %
	SOR-130	5,6	398	87 %

C. — Importance et allure des processus de minéralisation du glycérophosphate aux faibles humidités

Au pF 5,0 le pourcentage de glycérophosphate minéralisé atteint des valeurs allant de 20 à 87 p. 100 (tableau 37). Dans 10 sur 14 sols examinés, le pourcentage de minéralisation dépasse 50 p. 100.

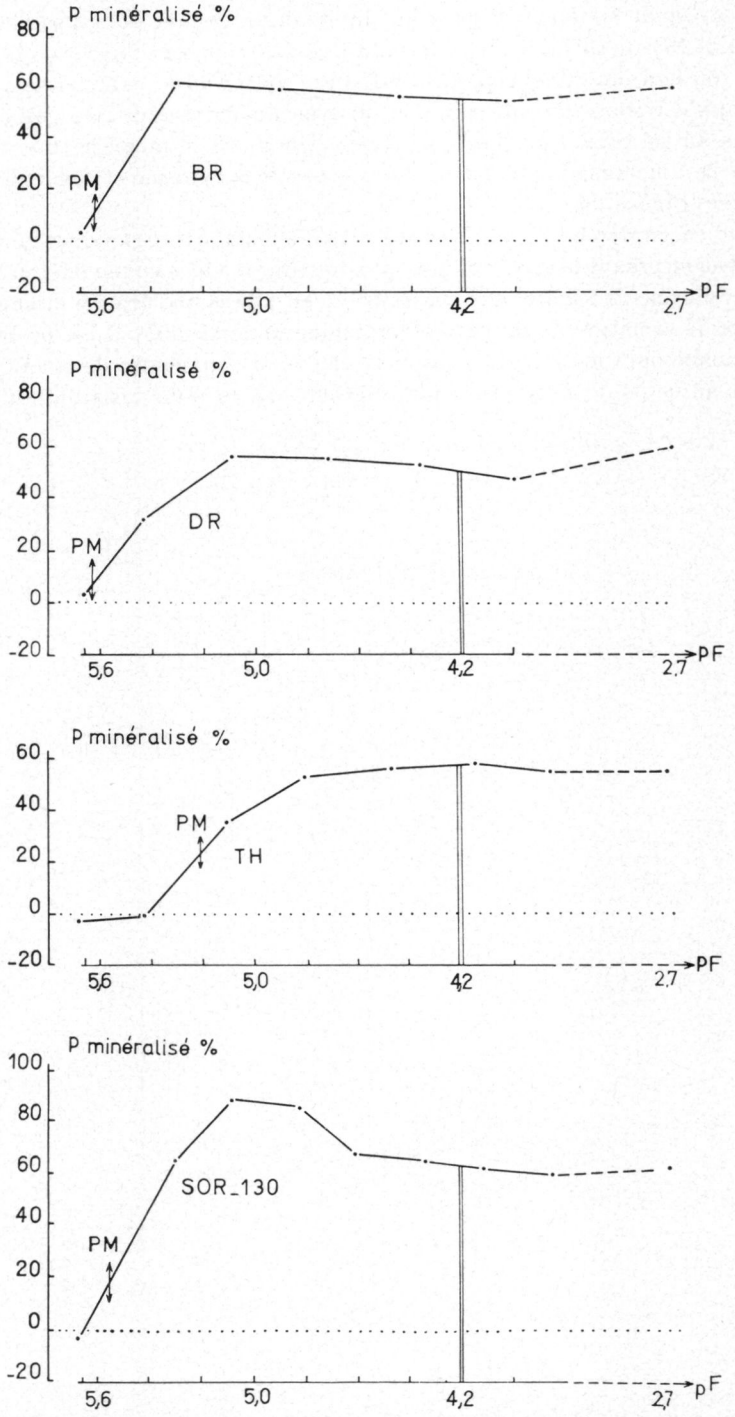


FIG. 18. — *Influence du pF sur la minéralisation du glycérophosphate de sodium. Les lettres PM indiquent l'emplacement des seuils de minéralisation. De haut en bas : sol brun subaride BB, sol faiblement ferrallitique DR, sol d'argile noire tropicale TH et sol hydromorphe typique SOR-130.*

Les courbes de minéralisation, qui n'ont été dessinées que pour 4 sols, dont un sol brun subaride BB, un sol faiblement ferrallitique DR, un sol d'argile noire tropicale TH et un sol hydromorphe typique SOR-130, sont toutes caractérisées par une inflexion aux environs du pF 4,0. On observe un maximum très net au pF 5,1 dans le cas du sol SOR-130 (figure 18). Un phénomène de même nature a déjà été signalé par la minéralisation de l'azote dans le cas de la tyrosine et des feuilles d'Arachide broyées (figure 14).

Il faut se garder de généraliser à d'autres substances organiques phosphatées les résultats concernant le glycérophosphate de sodium. On a vu, en effet, à l'occasion de l'étude du cycle de l'azote, que les seuils étaient, dans une grande mesure, sous la dépendance de la nature de la matière organique minéralisable. Il est probable qu'il en est de même pour le cycle du phosphore et l'on se souviendra de ce que les seuils déterminés au cours de cette étude n'intéressent que la minéralisation du glycérophosphate.

CHAPITRE VII

INTERACTION DES CYCLES DU CARBONE ET DE L'AZOTE

Les chapitres précédents ont été consacrés essentiellement à l'étude des processus de minéralisation par voie biologique. Suivant la définition de la Société américaine de Science du Sol, ces processus consistent dans « le passage d'un élément de sa forme d'immobilisation à sa forme inorganique, assimilable par les plantes, soit par autolyse, soit par décomposition microbiologique », les cas d'immobilisation des formes inorganiques, par voie chimique ou physico-chimique, étant évidemment exclus. Inversement, l'immobilisation par voie biologique implique « le passage d'un élément provenant d'un composé minéral dans une combinaison organique dans les cellules microbiennes ou les tissus végétaux » (124). En fait, ces deux processus opposés, se développant simultanément dans le sol, peuvent être considérés comme le résultat de l'interaction des cycles du carbone et de l'azote.

Le rapport C/N des substances incorporées est un des meilleurs indices permettant de prévoir l'importance relative des processus de minéralisation et des processus d'immobilisation, les substances ayant un rapport C/N élevé tendant à immobiliser l'azote plutôt qu'à le minéraliser. Il existe donc une valeur limite du rapport C/N au-delà de laquelle il y a immobilisation. Mais cette valeur limite dépend des conditions expérimentales : type de sol utilisé, durée d'incubation, nature des substances incorporées. C'est ce qui explique que les différents auteurs avancent des chiffres assez variables. Même si l'on admet, avec HARMSEN et VAN SCHREVEN (53), IRITANI et ARNOLD (63), que la valeur limite du rapport C/N est approximativement de 20, il ne faut pas oublier qu'il s'agit seulement d'une moyenne et que l'on peut fort bien avoir des signes d'immobilisation, dès que l'on atteint un rapport C/N de 13 ou 14. C'est d'ailleurs ce qui a été observé en particulier par JENSEN et SALTER cités par WINSOR (124). Nous avons personnellement vérifié qu'un mélange de glucose et de nitrate de potassium ayant un rapport C/N de 14,5 pouvait fort bien entraîner une immobilisation importante et extrêmement rapide (tableau 38).

Dans ce chapitre, on examinera d'une part les processus d'immobilisation aux faibles humidités de l'azote minéral incorporé au sol sous forme de nitrate de potassium ou de sulfate d'ammonium, par des hydrates de carbone de composition bien définie (glucose, amidon, cellulose) et par une substance d'origine végétale de composition complexe (feuilles de Teck). On étudiera d'autre part les processus d'immobilisation aux faibles humidités de l'azote minéral ou minéralisable du sol, par des substances végétales complexes à rapport C/N croissant.

On a distingué les *seuils d'immobilisation de l'azote minéral global* d'une part et *les seuils d'immobilisation de l'azote nitrique* d'autre part. Les premiers ont été déter-

minés à partir des teneurs en azote minéral global ($N\text{-}NH_3+N\text{-}NO_3$) et les seconds à partir des teneurs en azote nitrique uniquement ($N\text{-}NO_3$). Il n'y a concordance entre les deux seuils que lorsque l'azote minéral est incorporé au sol sous forme nitrique. Mais lorsque cet apport est effectué sous forme d'azote ammoniacal, il y a un écart important entre les seuils, car les processus de nitrification sont, en général, beaucoup plus lents que les processus d'immobilisation. Parfois même — c'est le cas des sols à nitrification déficiente — il n'est pas possible de mettre en évidence un seuil d'immobilisation des nitrates. En fait, c'est le seuil d'immobilisation de l'azote minéral global qui présente le plus d'intérêt et c'est surtout de lui qu'il sera question ici.

En ce qui concerne la représentation graphique des résultats, on a porté en ordonnée les quantités d'azote immobilisé dans les conditions expérimentales. Ces quantités ont été calculées en déduisant des teneurs en azote minéral des échantillons témoins (enrichis seulement en azote minéral), les teneurs en azote minéral des échantillons enrichis à la fois en azote minéral et en substances hydrocarbonées. Comme le premier chiffre est plus grand que le deuxième, la valeur résultante est positive et la courbe correspondante représente une fonction croissante lorsque le pF diminue (figures 19 et 20).

A. — Immobilisation de l'azote minéral par le glucose l'amidon et la cellulose

1. — *Immobilisation par le glucose*

a) *Technique expérimentale.*

L'enrichissement des échantillons a été effectué avec le mélange suivant dont la composition exprimée en mg pour 100 g de sol est la suivante :

Glucose	725 mg
Nitrate de potassium	145 mg
Mélange minéral SI	36 mg
Carbonate de calcium précipité	362 mg

ce qui correspond à un apport de 0,29 p. 100 de carbone et 0,02 p. 100 d'azote minéral. Le rapport C /N du mélange est donc de 14,5.

L'expérience n'a été réalisée qu'avec un seul sol ; il s'agit de l'argile noire tropicale PT-61. Mais on a effectué des mesures pour trois durées d'incubation successives : 1, 2 et 4 semaines.

b) *Seuils d'immobilisation par le glucose.*

Pour le sol PT-61, le seuil d'immobilisation de l'azote global par le glucose se situe au pF 5,5 dès la première semaine. Il reste fixé à ce niveau aux deuxième et quatrième semaines (tableau 38). Ce seuil, est à 0,1 unité pF près, le même que celui qui a été déterminé pour la glucolyse. On a vu, en effet, que ce dernier était de 5,4 (tableau 27).

Le seuil d'immobilisation de l'azote minéral global par le glucose se confond donc avec le seuil de glucolyse.

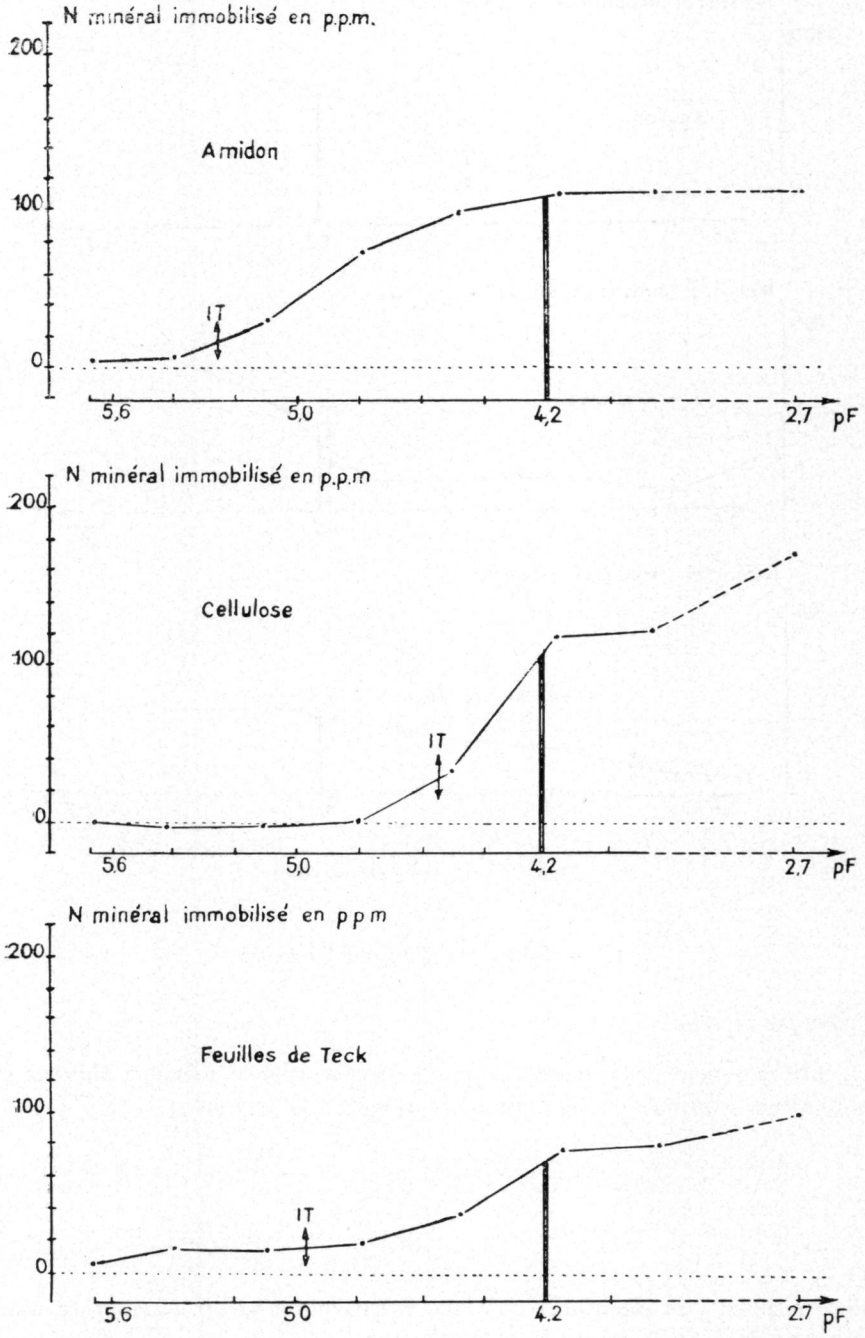


FIG. 19. — *Influence du pF sur l'immobilisation de l'azote du sulfate d'ammoniaque par incorporation d'amidon, de cellulose ou de feuilles de* Tectona grandis. *Les lettres IT indiquent l'emplacement de l'azote minéral global. De haut en bas : immobilisation par l'amidon, la cellulose et les feuilles de* Tectona grandis. *Dans les trois cas, le sol utilisé a été un sol d'argile noire tropicale (PT-61).*

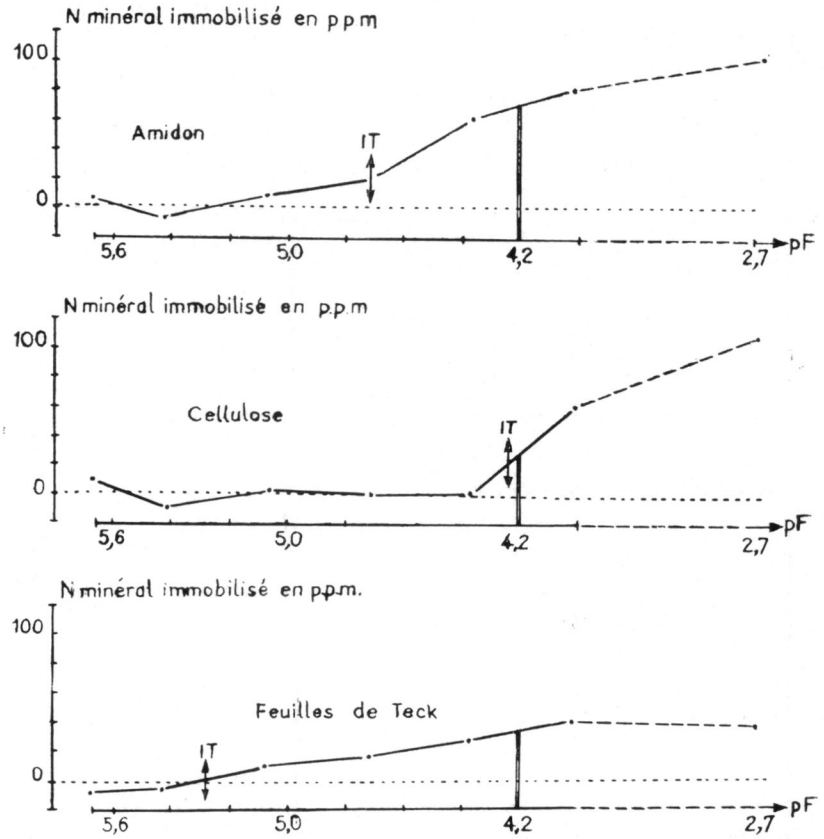


FIG. 20. — *Même protocole expérimental que dans le cas de la figure 19, mais appliqué au sol faiblement ferrallitique DR.*

2. — *Immobilisation par l'amidon*

a) *Technique expérimentale.*

L'enrichissement des échantillons a été effectué avec le mélange suivant dont la composition exprimée en mg pour 100 g de sol est la suivante :

Amidon soluble	500 mg
Nitrate de potassium	75 mg
Mélange minéral SI	15 mg
Carbonate de calcium précipité	100 mg

ce qui correspond à un apport de 0,20 p. 100 de carbone et 0,01 p. 100 d'azote minéral. Le rapport C/N du mélange est donc de 20.

L'expérience a été conduite à la fois avec une argile noire tropicale biologiquement très active (TH) et un sol faiblement ferrallitique (DR). La durée d'incubation a été fixée uniformément à deux semaines.

b) *Seuils d'immobilisation par l'amidon*

Les seuils d'immobilisation du sulfate d'ammoniaque par l'amidon se situent respectivement aux pF 5,3 et 4,7 pour les sols TH et DR (tableau 38 et figures 19 et 20). Ces résultats sont à rapprocher de ceux qui concernent les seuils d'amylolyse, dont les valeurs déterminées par la méthode respirométrique sont, pour la même incubation de deux semaines, de 5,2 pour les deux sols (tableau 29). Si la concordance est satisfaisante pour le sol TH, elle l'est nettement moins pour le sol DR, vraisemblablement en raison de la micro-hétérogénéité plus élevée de ce dernier sol.

TABLEAU 38

Seuils d'immobilisation de l'azote minéral par différentes substances hydrocarbonées.

Nature et origine de l'azote minéral	Substance hydrocarbonée	C/N	Durée de l'incubation en semaines	Référence du sol	Seuils
Apport complémentaire de KNO_3	Glucose	14,5	1	PT-61	5,5
			2	PT-61	5,5
			4	PT-61	5,5
Apport complémentaire de $(NH_4)_2SO_4$	Amidon	20	2	TH	5,3
			2	DR	4,7
Apport complémentaire de $(NH_4)_2SO_4$	Cellulose	20	2	TH	4,5
			2	DR	4,2
Azote minéral et minéralisable préexistant dans le sol	Feuilles d'*Acacia albida* broyées	27	4	TH	5,1
			4	DR	5,3
Azote minéral et minéralisable préexistant dans le sol	Feuilles de *Tectona grandis* broyées	51	4	TH	5,3
			4	DR	5,3
Apport complémentaire de $(NH_4)_2SO_4$	Feuilles de *Tectona grandis* broyées	24	4	TH	5,0
			4	DR	5,3

3. — *Immobilisation par la cellulose*

a) *Technique expérimentale.*

L'enrichissement utilisé ici n'a différé du précédent que par le fait qu'on y a remplacé l'amidon par la cellulose.

L'expérience a été conduite dans les mêmes sols et la durée d'incubation a aussi été de deux semaines.

b) *Seuils d'immobilisation par la cellulose.*

Les seuils d'immobilisation du sulfate d'ammoniaque par la cellulose se situent respectivement aux pF 4,5 et 4,2 pour les sols TH et DR. En ce qui concerne le premier d'entre eux, la concordance est excellente avec le seuil de cellulolyse déterminé par la méthode du papier-filtre qui, pour deux semaines d'incubation, s'élève à 4,5. Pour le deuxième sol (DR), il y a un décalage de 0,2 unité pF puisque son seuil de cellulolyse à deux semaines est de 4,5 (tableau 32, figures 19 et 20).

B. — Cas de l'incorporation au sol de substances complexes d'origine végétale

En fait, les processus d'immobilisation de l'azote minéral dans le sol y apparaissent lors de l'incorporation de résidus végétaux. C'est pour nous rapprocher de ces conditions pratiques, que nous avons effectué des enrichissements avec différentes substances d'origine végétale. Il s'agit de feuilles broyées des espèces suivantes, choisies d'après leur rapport C/N :

a) Feuilles d'*Arachis hypogea* (C/N = 13)
b) Feuilles d'*Acacia albida* (C/N = 27).
c) Feuilles de *Tectona grandis* (C/N = 51).

Les feuilles d'Arachide ont été récoltées en fin de végétation ainsi que celles d'*Acacia albida*. Les feuilles de Teck ont été récoltées au moment de leur chute dans des cadres spéciaux (77). La composition minérale de ces feuilles figure au tableau 17.

L'Arachide est une plante trop connue pour qu'il soit nécessaire de la présenter ici.

Mais l'*Acacia albida* (= *Faidherbia albida*) mérite une parenthèse. « C'est, écrit Aubreville, un des arbres les plus communs et les plus utiles de toute l'Afrique sahélo-soudanaise. Il est curieux à plus d'un point de vue. L'*Acacia albida* est en effet feuillé en saison sèche ; mais, en revanche, il perd ses feuilles au début de la saison des pluies, de sorte qu'il ne gêne pas les cultures sous-jacentes par son ombrage... Il intéresse les pasteurs parce que ses rameaux feuillés et ses fruits sont fourragers (5). » Sa réputation d'accroître la fertilité du sol a été confirmée récemment par Charreau et Vidal (26).

Quant au Teck (*Tectona grandis*), il nous a paru utile de l'étudier ici, car c'est une essence de grand avenir en zone tropicale sèche et il n'est pas sans intérêt de chercher à préciser l'évolution, dans les sols de teckeraies, des débris végétaux qui y retournent naturellement.

Dans la plupart de nos expériences, les sols n'ayant reçu aucun apport préalable d'azote minéral, les phénomènes d'immobilisation ont porté uniquement sur l'azote minéral préexistant naturellement dans le sol, ainsi que sur l'azote qui a pu s'y minéraliser au cours de l'incubation. Toutefois dans le cas du Teck, on a effectué une série d'expériences complémentaires comportant l'enrichissement simultané en feuilles de Teck broyées et en sulfate d'ammoniaque.

Ainsi qu'on l'a déjà indiqué au chapitre III, paragraphe F, les feuilles d'Arachide broyées ont été incorporées au sol à la dose de 1 p. 100. C'est cette dose qui a également été adoptée pour les autres feuilles. Dans le cas de l'enrichissement en feuilles d'Arachide broyées, les expériences ont porté sur onze sols différents énumérés au tableau 21. Dans le cas de l'enrichissement avec les feuilles d'*Acacia albida* et de *Tectona grandis*, les expériences ont été conduites uniquement avec les deux sols TH et DR.

La durée d'incubation a été fixée uniformément à quatre semaines.

1. — *Immobilisation partielle de l'azote minéral par les feuilles d'Arachide broyées*

Lors de l'incorporation au sol de feuilles d'Arachide broyées, il n'y a pas diminution mais augmentation du taux d'azote minéral. Il y a donc prédominance des phénomènes de minéralisation sur les phénomènes d'immobilisation. Mais on a déjà

remarqué que les courbes de minéralisation de l'Arachide présentaient toutes un minimum situé en général au voisinage du pF 4,2 et pouvant s'écarter très sensiblement de cette moyenne (figure 14). Ce minimum correspond à une régression des processus de minéralisation par rapport à ceux d'immobilisation. Il n'y a pas, à proprement parler, de blocage de l'azote mais on observe une immobilisation partielle. Celle-ci n'est pas plus importante, car le rapport C/N des feuilles d'Arachide est assez bas.

2. — *Immobilisation de l'azote minéral par les feuilles d'*Acacia albida *broyées*

L'incorporation au sol de feuilles d'*Acacia albida* broyées provoque une immobilisation très rapide de l'azote minéral et minéralisable préexistant dans le sol. Les seuils d'immobilisation se situent, pour les sols TH et DR, respectivement aux pF 5,1 et 5,3. Ces seuils sont très élevés (tableau 38).

Lorsque l'humidité devient suffisante, les phénomènes d'immobilisation ont tendance à céder devant les phénomènes de minéralisation, de sorte que l'immobilisation de l'azote minéral global ($N\text{-}NH_3 + N\text{-}NO_3$) diminue d'importance. Cette immobilisation de l'azote minéral global passe donc par un maximum au voisinage du pF 4,2, puis tend à diminuer lorsque l'humidité augmente.

3. — *Immobilisation de l'azote minéral par les feuilles de Teck broyées*

a) *Sans apport complémentaire d'azote minéral.*

L'incorporation au sol de feuilles de Teck broyées provoque une immobilisation rapide de l'azote minéral et minéralisable préexistant dans le sol.

Le seuil d'immobilisation de l'azote minéral global se situe au pF 5,3 pour les deux sols étudiés : TH et DR (tableau 38). Comme dans le cas de l'incorporation de feuilles d'*Acacia albida*, on a observé ici, mais avec moins de netteté, une tendance au développement des phénomènes d'immobilisation aux environs du pF 4,2.

b) *Avec apport complémentaire d'azote minéral.*

Outre les feuilles de Teck broyées, on a ajouté dans ce cas du sulfate d'ammoniaque et des sels minéraux, aux doses suivantes exprimées en mg pour 100 g de sol :

Feuilles de Teck broyées	1 000 mg
Sulfate d'ammoniaque	96 mg
Mélange minéral SI	3 mg
Carbonate de calcium précipité	500 mg

ce qui correspond à un apport de 0,485 p. 100 de carbone et 0,020 p. 100 d'azote minéral. Le rapport C/N est donc de 24, c'est-à-dire qu'il est diminué de moitié puisque dans les feuilles de Teck il est de 51.

Les seuils d'immobilisation de l'azote minéral global déterminés pour les sols TH et DR, sont respectivement de 5,0 et 5,3 (graphiques du bas des figures 19 et 20 et tableau 38).

C. — Comparaison des seuils d'immobilisation de l'azote par différentes substances hydrocarbonées

Le tableau 38 permet de classer les substances responsables de l'immobilisation de l'azote minéral en trois catégories distinctes :

a) *substances provoquant l'immobilisation à des pF inférieurs à* 4,5
ex : la cellulose ;

b) *substances provoquant l'immobilisation à des pF compris entre* 4,5 *et* 5,4
ex : amidon, feuilles d'*Acacia albida* ou de Teck broyées ;

c) *substances provoquant l'immobilisation à des pF supérieurs à* 5,4
ex : le glucose.

Cette classification n'est que le reflet de la classification des exigences de la microflore tellurique vis-à-vis du facteur eau. En effet, le seuil d'immobilisation de l'azote par la cellulose est confondu avec le seuil de cellulolyse. Le seuil d'immobilisation de l'azote par l'amidon l'est avec le seuil d'amylolyse. De même le seuil d'immobilisation de l'azote par le glucose l'est avec le seuil de glucolyse.

Quant aux feuilles broyées à rapport C/N supérieur à 20, leur dégradation apparaît à des pF aussi élevés que celle de l'amidon. Elles appartiennent à la catégorie *b* définie ci-dessus.

D. — Intensité des phénomènes d'immobilisation de l'azote aux faibles humidités

Si les *niveaux des seuils* d'immobilisation de l'azote minéral semblent être relativement indépendants de la nature des types pédologiques, il n'en est pas de même pour *l'intensité* des phénomènes d'immobilisation. Les figures 19 et 20 mettent parfaitement en relief les différences existant entre le sol TH biologiquement actif et le sol DR qui l'est beaucoup moins. C'est ainsi que, dans le premier cas (TH), l'immobilisation par l'amidon au pF 4,2 dépasse 50 p. 100 de l'azote minéral apporté, tandis que dans le deuxième cas (DR), elle est seulement de l'ordre de 35 p. 100.

Des expériences de contrôle ont permis de vérifier, qu'au cours de ces phénomènes d'immobilisation, il n'y avait aucune perte significative d'azote. Allison et coll. opérant à des tensions d'un tiers d'atmosphère, ont prouvé que les pertes par dénitrification étaient insignifiantes, même dans des échantillons enrichis en glucose (1 p. 100) ou en paille de blé (2 p. 100), pourvu que l'aération soit normale. Or, c'est précisément dans des conditions d'aération normale que nous nous sommes toujours placé, et il n'est pas étonnant que les dosages effectués ici, à titre de vérification, n'aient mis en évidence aucune perte significative d'azote.

CHAPITRE VIII

ROLES RESPECTIFS DE LA MICROFLORE BACTÉRIENNE ET DE LA MICROFLORE FONGIQUE

Lors de la mise en évidence des seuils d'activité des différents groupements physiologiques de microorganismes, on n'a pas cherché, à l'origine, à distinguer le rôle propre des Bactéries et celui des Champignons. Mais il est apparu, par la suite, indispensable de préciser le domaine d'action de chacune de ces microflores en fonction de leurs exigences hydriques.

On a déjà signalé que RYBALKINA et KONONENKO avaient remarqué que, dans certains sols, les Champignons semblaient favorisés aux faibles humidités (104). Il s'agit là d'un fait général qui a pu être vérifié dans tous les types de sol étudiés et quels que soient les enrichissements adoptés. Ces derniers ont consisté en apports de substances relativement simples, telles que l'amidon, ou de substances plus complexes, telles que des feuilles broyées d'espèces végétales diverses.

A. — TECHNIQUES EXPÉRIMENTALES

1. — *Numération de la microflore bactérienne totale sur le milieu* WAKSMAN

Pour la numération globale des Bactéries et Actinomycètes que nous appellerons aussi numération de la microflore bactérienne totale, de nombreux auteurs ont employé le milieu à l'extrait de terre qui est incontestablement celui qui se rapproche le plus du milieu édaphique. Nous ne l'avons cependant pas adopté et nous avons préféré un milieu synthétique qu'il est plus facile de préparer et qui donne des résultats plus reproductibles : c'est le *sodium albumenate agar* de WAKSMAN (64,107). Comme les lectures ont été faites en général au cinquième jour, on n'a ainsi dénombré que les germes à croissance rapide. Cette façon de procéder est sans inconvénient car, lorsque les sols sont enrichis en substances se dégradant rapidement comme l'amidon ou les feuilles broyées, la proportion de Bactéries et Actinomycètes à croissance lente est très réduite.

2. — *Numération de la microflore fongique totale sur milieu* MARTIN

Le milieu peptoné au rose bengale et à la streptomycine de MARTIN, adopté par beaucoup de laboratoires, a été utilisé ici avec succès (64). Comme pour le milieu de WAKSMAN, on a effectué des comptages dès le cinquième jour. Cette numération

précoce n'a présenté aucun inconvénient pour les mêmes raisons que dans le cas précédent.

3. — *Enrichissements et durées d'incubation*

Les enrichissements ont toujours été effectués dans les conditions décrites antérieurement. En ce qui concerne les durées d'incubation, elles ont été fixée à une semaine dans le cas d'apport d'amidon et à quatre semaines dans le cas d'apport de feuilles broyées d'Arachide, de Teck et *d'Acacia albida*. On a remarqué, par la suite, que ce dernier temps d'incubation aurait pu être ramené à deux semaines.

B. — Prolifération de la microflore bactérienne totale et de la microflore fongique totale aux faibles humidités

1. — *Seuils de prolifération de la microflore bactérienne totale*

Comme il fallait s'y attendre, les seuils déterminés *dans le cas des sols non enrichis* sont très variables. Ils ne sont qu'exceptionnellement supérieurs au pF 4,2 (tabl. 39).

TABLEAU 39

Seuils de prolifération des Bactéries et Actinomycètes déterminés avec milieu Waksman

Enrichissement	Sol faiblement ferrallitique DR	Sols d'argile noire		
		TH-T	PT	PT-61
Amidon	4,9	5,0	4,9	4,8
Feuilles d'*Arachis hypogea*	4,7	5,0	—	4,8
Feuilles d'*Acacia albida*	5,0	5,0	—	—
Feuilles de *Tectona grandis*	4,8	4,9	—	4,6
Témoin (sol non enrichi)	2,7 < S < 4,0	4,7	4,0	4,4

Par contre, *lorsqu'il y a eu enrichissement*, les seuils de prolifération de la microflore bactérienne totale se sont groupés dans une gamme de pF compris entre 4,6 et 5,0, quelle que soit la nature de la substance incorporée (tableau 39). Ces seuils sont, en général, inférieurs de plusieurs dixièmes d'unité pF à ceux qui ont été déterminés, pour les processus correspondants, par des méthodes biochimiques ou, comme on le montrera ci-dessous, par la méthode biologique basée sur l'étude de la microflore fongique. On est donc en droit de conclure que *les Bactéries n'interviennent pas, ou pratiquement pas, aux pF supérieurs à* 4,6-5,0.

2. — *Seuils de prolifération de la microflore fongique totale*

Le tableau 40 met en évidence un décalage important entre les seuils de prolifération de la microflore bactérienne totale et les seuils correspondants pour la microflore fongique totale, quel que soit le type d'enrichissement utilisé ou le type de sol. Ce décalage est, en général, de l'ordre de 0,6 unité pF.

Les courbes de densité (exprimées en logarithme) en fonction du pF, établies dans le cas de l'enrichissement en amidon (figure 21), font ressortir de façon remarquable la très faible exigence en eau de la microflore fongique. Les seuils de prolifération des Champignons dans le sol d'argile noire PT-61 et dans le sol ferrallitique peu typique DR, correspondent en effet à des teneurs en eau de 4,4 p. 100 dans le 1er cas et de 0,7 p. 100 dans le 2e.

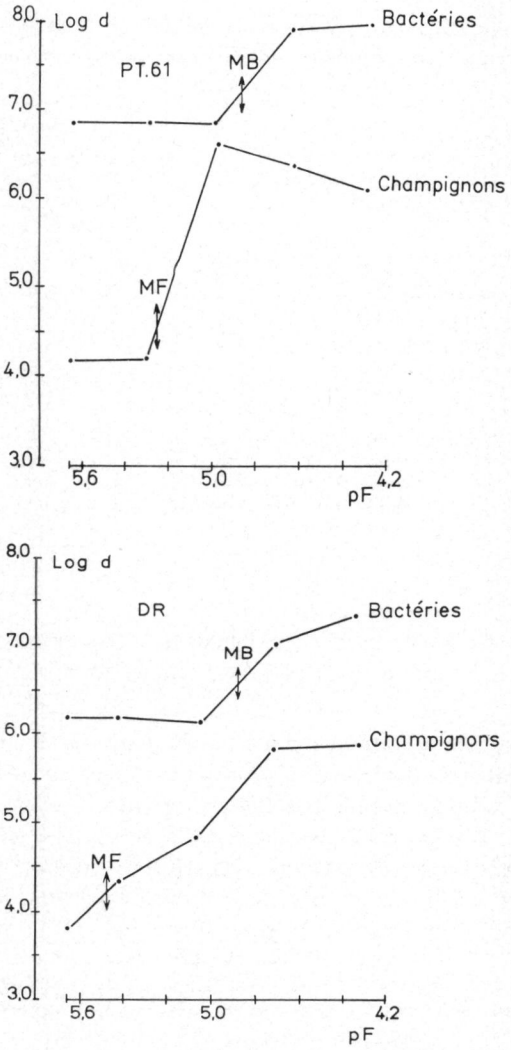


FIG. 21. — *Comparaison des courbes de prolifération, en fonction du pF, de la microflore fongique et de la microflore bactérienne, dans deux sols enrichis en amidon (sol d'argile noire tropicale PT-61 et sol faiblement ferrallitique DR). On a porté en ordonnée les densités exprimées en logarithme (log d).*

Le rôle prépondérant des Champignons aux très faibles humidités sera à nouveau confirmé expérimentalement à l'occasion de l'étude de l'évolution de la stabilité structurale.

TABLEAU 40

Comparaison des seuils de prolifération des Bactéries et Actinomycètes déterminés avec le milieu WAKSMAN *et des seuils de prolifération des Champignons déterminés avec le milieu* MARTIN.

Type de sol	Enrichissement	Seuil de prolifération des	
		Bactéries et Actinomycètes (WAKSMAN)	Champignons (MARTIN)
Sol faiblement ferrallitique DR	Amidon (0,5 %)	4,9	5,5
Sol d'argile noire tropicale PT-61	Amidon (0,5 %)	4,8	5,3
Sol d'argile noire tropicale TH-T	Amidon (0,5 %)	5,0	5,2
	Glucose (2 %) et sulfate d'ammoniaque (0,2 %)	5,0	5,5
	Feuilles d'*Arachis hypogea* (2 %)	5,0	5,6
	Feuilles d'*Acacia albida* (2 %) .	5,0	5,5
	Feuilles de *Tectona grandis* (2 %)	4,9	5,5
	Témoin (sol non enrichi)	4,7	5,4

C. — ÉVOLUTION DU pH PENDANT LES PROCESSUS DE DÉGRADATION AUX FAIBLES HUMIDITÉS

Si les méthodes de numération, comme les méthodes respirométriques, présentent l'avantage considérable de contribuer à prouver le rôle essentiel des microorganismes dans les processus de dégradation aux faibles humidités, elles n'en sont pas moins longues et délicates. Il n'est donc pas sans intérêt de signaler ici qu'il est possible de déterminer facilement l'ordre de grandeur des seuils de décomposition des substances végétales complexes, en se basant sur les variations de pH concomitantes (tabl. 41).

TABLEAU 41

Seuils basés sur les variations de pH liées à la dégradation de différentes substances d'origine végétale.

Enrichissement	Sol ferrugineux tropical lessivé DH	Sol faiblement ferrallitique DR	Sol d'argile noire tropicale TH
Amidon (0,5 %)	5,2	5,2	5,2
Feuilles d'*Arachis hypogea* (2 %)	—	5,6	5,5
Feuilles d'*Acacia albida* (2 %)	5,6	5,5	5,2
Feuilles de *Tectona grandis* (2 %)	5,6	5,2	5,1

Ces variations se traduisent, pour les quatre enrichissements étudiés (amidon et feuilles broyées), par une augmentation du pH de l'ordre de l'unité entre les pF 5,6 et 2,7 dans les sols non tamponnés du type DR. Cette augmentation du pH est plus faible dans le cas des sols mieux tamponnés du type TH.

Toutefois, comme il s'agit d'une méthode indirecte, les seuils basés sur les variations de pH n'ont été donnés qu'à titre indicatif et il n'en a pas été tenu compte lors de l'interprétation générale des résultats.

CHAPITRE IX

ÉVOLUTION DE LA STABILITÉ STRUCTURALE

La stabilité structurale du sol peut être considérablement améliorée par suite du développement des myceliums fongiques ou des cellules bactériennes produisant un mucus abondant. En plus de ces effets directs, la microflore est capable de faire la synthèse de composés organiques protégeant les agrégats. Les produits de métabolisme microbien jouent même souvent un rôle plus important que les cellules microbiennes elles-mêmes (49, 76, 120).

La preuve a éré faite, dans les chapitres précédents, que de nombreux groupes physiologiques de microorganismes étaient encore actifs, parfois même très actifs, aux pF élevés. On était donc en droit de penser que, dans ces conditions, la microflore pouvait encore intervenir dans l'évolution de la stabilité structurale du sol. C'est ce que nous avons cherché à vérifier en soumettant différents sols de l'Ouest africain à des traitements destinés à mettre en évidence, en plus du rôle du facteur humidité, celui de la nature de la matière organique incorporée au sol et des microorganismes responsables de l'évolution de la structure.

A. — Techniques expérimentales

1. — *Préparation des échantillons*

Les échantillons utilisés ont été préparés avec les précautions prescrites par Henin et coll. (57). Les mottes ont été forcées à la main à travers un tamis de 2 mm à mailles carrées et la terre fine a été éliminée par passage sur un tamis de 0,2 mm.

2. — *Enrichissements*

a) *Enrichissement avec un mélange de glucose et de sulfate d'ammoniaque.*

Dans son étude sur la stabilité structurale en liaison avec les facteurs biologiques, Henin a préconisé l'emploi de glucose comme source de carbone « car, en lui-même ou dans ses produits de dégradation, il est peu susceptible de modifier la stabilité de la structure » (56).

L'enrichissement, dont la formule est inspirée de celle de cet auteur, a consisté en l'adjonction de glucose et de sulfate d'ammoniaque aux doses suivantes exprimées en mg par 100 g de sol :

Glucose	2 000 mg
Sulfate d'ammoniaque	200 mg

Le rapport C/N est donc environ 19.

Ce mélange a été incorporé au sol par rotation lente du récipient contenant chaque échantillon, afin d'éviter de briser les agrégats préexistants.

b) *Enrichissement avec des feuilles d'Arachide broyées.*

Parallèlement à l'enrichissement en glucose, on a procédé à un essai d'enrichissement avec des feuilles d'Arachide broyées qui se rapproche sensiblement plus des conditions réalisées dans la pratique agricole. Cet enrichissement a été effectué à une dose deux fois plus forte que dans les expériences antérieures, soit 2 p. 100 au lieu de 1 p. 100. L'incorporation a été faite avec les précautions indiquées au paragraphe précédent.

3. — *Humidification*

L'humidification ne pouvant être effectuée par malaxage, comme dans les expériences précédentes, on a utilisé le principe de la mise en équilibre des sols avec des atmosphères à degré hygrométrique réglé par des solutions saturées.

Chaque échantillon de 100 g de sol a été mis dans un bocal de 1 litre à fermeture canette renfermant un bécher contenant lui-même la solution saturée correspondant au degré hygrométrique désiré. Les quatre solutions saturées sont décrites au tableau 2. Une fois l'équilibre réalisé, les échantillons de sol se sont trouvés amenés aux pF 5,6-5,4-5,1-4,9.

Cette méthode présente les deux avantages suivants :

a) Elle évite la destruction, même partielle, des agrégats préexistants.

b) Elle élimine l'erreur provenant de l'accroissement de tension osmotique dû à l'incorporation de doses de glucose et de sulfate d'ammoniaque plus importantes que dans les expériences antérieures (chapitre I, paragraphe D).

Elle présente, par contre, deux inconvénients :

a) Elle nécessite une durée d'incubation plus longue pour permettre à l'équilibre de s'établir. Cette durée a été fixée arbitrairement à six semaines dans la plupart des cas. On n'a adopté une incubation plus longue (10 semaines) que lors de l'étude de la dégradation de la stabilité structurale.

b) Elle ne permet guère d'étudier les phénomènes liés à des humidités relatives supérieures à 95 p. 100, car des condensations risquent alors d'apparaître, mettant ainsi en cause la validité même des expériences. Afin d'éviter cet écueil, nous nous sommes donc limité à l'étude de quatre niveaux d'humidité dont le plus haut correspond à une humidité relative de 95 p. 100. Le niveau le plus bas correspond à une humidité relative de 75 p. 100, d'où un pF de 5,6 qui a servi de base au calcul des seuils.

4. — *Techniques d'évaluation de la stabilité structurale*

La stabilité structurale du sol a été évaluée d'après la méthode de HENIN, les résultats étant exprimés par *l'indice d'instabilité S* qui est à la fois fonction du pourcentage d'agrégats, de l'état de dispersion et de la teneur en sables grossiers.

$$S = \frac{(A + L) \text{ maximum}}{\frac{AgA + AgB + AgE}{3} - 0{,}9\ S.G.}.$$

« Le pourcentage d'agrégats supérieurs à 0,2 mm, stables à l'eau, est la moyenne arithmétique des trois chiffres obtenus :

— sans prétraitement : AgE (témoin) ;

— après prétraitement à l'alcool : AgA (l'alcool a généralement un rôle protecteur) ;

— après prétraitement au benzène : AgB (le benzène a, au contraire, un rôle sensibilisateur, tout au moins dans la mesure où le sol est pauvre en matière organique).

L'état de dispersion est obtenu en effectuant une analyse mécanique, sans addition de dispersant, sur les éléments passés au travers du tamis dans les trois cas précédents. C'est la somme argile + limon, (A + L) maximum, qui est prise en considération, comme étant plus représentative de la dispersion que la fraction argile proprement dite. On se place dans les conditions les plus défavorables en ne tenant compte que de la valeur maximum rencontrée d'ordinaire, soit avec le témoin, soit plus souvent encore après le traitement au benzène.

La fraction sables grossiers S.G. joue un rôle important dans le taux d'agrégats stables obtenus. Pour tenir compte, d'une part des erreurs d'échantillonnage dans les terres pauvres en sable, d'autre part de la stabilité que peuvent donner, dans certains cas, les sables grossiers dans les terres pauvres en éléments fins, la fraction sableuse est affectée du coefficient 0,9 » (86).

En outre, et souvent parallèlement à l'indice d'instabilité S, on a utilisé *un indice d'agrégation* qui n'est autre que le pourcentage des agrégats supérieurs à 0,2 mm, stables à l'eau, après prétraitement au benzène.

B. — Régénération de la stabilité structurale

1. — *Régénération par incorporation d'un mélange de glucose et de sulfate d'ammoniaque*

Les expériences de régénération de la structure par incorporation au sol du mélange de glucose et de sulfate d'ammoniaque, décrit au paragraphe A ci-dessus, ont porté sur des sols appartenant à trois types pédologiques différents.

TABLEAU 42

Régénération de la stabilité structurale d'un sol d'argile noire tropicale enrichi en glucose et sulfate d'ammoniaque entre les pF 5,6 et 4,9 (sol BAN-S).

pF	Tension en atmosphères	Densité des Bactéries et des Actinomycètes en logarithme (Waksman)	Densité des Champignons en logarithme (Martin)	Indice d'instabilité S (Hénin)
4,9	79	6,66	5,60	0,24
5,1	125	6,66	5,70	0,30
5,4	251	6,83	6,97	0,83
5,6	398	6,96	4,83	1,09
A (P = 0,05)		0,21	0,36	0,15
Seuil		—	5,5	5,5

a) *Cas des sols d'argile noire tropicale.*

Le tableau 42 relatif à ce premier sol (BAN-S) montre que la régénération de la stabilité structurale devient significative dès le pF 5,5. Au pF 4,9 l'indice d'instabilité S est d' 0,24, indiquant une excellente structure.

TABLEAU 43

Evolution de la stabilité structurale — mesurée par le pourcentage d'agrégats stables — de deux sols d'argile noire tropicale entre les pF 5,6 et 4,9.

pF	Tension en atmosphères	Sol BAN-S	Sol PT-ET	
		enrichi en glucose et sulfate d'amm.	enrichi en glucose et sulfate d'amm.	non enrichi (témoin)
4,9	79	52,5	45,7	23,3
5,1	125	41,5	39,7	23,0
5,4	251	27,4	24,1	23,5
5,6	398	23,8	23,3	22,9
A (P = 0,05)		2,3	2,9	0,9
Seuil		5,5	5,4	—

Des numérations de Bactéries et Actinomycètes sur milieu WAKSMAN et de Champignons sur milieu MARTIN effectuées sur les mêmes échantillons ont révélé que cette amélioration de la stabilité structurale était due au développement de la microflore fongique dont le seuil de prolifération est identique au seuil de régénération de la stabilité structurale.

Le tableau 43 donne les résultats relatifs à l'évolution de la stabilité structurale mesurée par le pourcentage d'agrégats stables après prétraitement au benzène, dans le cas du sol BAN-S et d'un sol du même type (PT-ET). Les seuils de régénération sont respectivement de 5,5 et 5,4, c'est-à-dire pratiquement les mêmes que précédemment.

b) *Cas des sols ferrugineux tropicaux lessivés.*

Les tableaux 44 et 46 confirment les résultats précédents pour deux sols ferrugineux tropicaux lessivés (DH-61 et DH-T). Bien que ces deux sols présentent des caractéristiques biologiques très différentes des sols d'argile noire étudiés ci-dessus, on constate que l'amélioration de la stabilité structurale se manifeste aux mêmes pF.

En ce qui concerne les numérations microbiennes (tableau 44), on observe encore le même accroissement de la densité des Champignons en même temps qu'une diminution de la densité des Bactéries et Actinomycètes. On notera toutefois qu'au-dessous du pF 5,1, se manifeste une tendance à la reprise de l'activité bactérienne. Celle-ci se développe progressivement au détriment de l'activité fongique lorsque le pF continue à diminuer (fig. 21).

Les mesures de dégagement de CO_2 effectuées pendant la durée de l'incubation, révèlent un démarrage significatif de l'activité biologique dès le pF 5,5. On a pu démontrer l'existence, entre l'indice d'instabilité *S* et le dégagement cumulé de CO_2 en

six semaines X, d'une corrélation linéaire inverse hautement significative, l'équation de régression étant de la forme :

$$S = -0{,}000\,488\,X + 0{,}60$$
$$(\text{avec } r = -0{,}84 \text{ et } P < 0{,}001)$$

Cette corrélation confirme le rôle primordial des microorganismes dans l'amélioration de la stabilité structurale aux faibles humidités.

TABLEAU 44

Régénération de la stabilité structurale d'un sol ferrugineux tropical lessivé, enrichi en glucose et sulfate d'ammoniaque entre les pF 5,6 et 4,9 (sol DH-61).

pF	Tension en atmos.	Dégagement de CO_2 cumulé en mg/100 g de sol		Densité des Bactéries en logarithme (WAKSMAN)	Densité des Champignons en logarithme (MARTIN)	Indice d'instabilité S (HENIN)
		3 semaines	6 semaines			
4,9	79	295	569	5,94	6,84	0,31
5,1	125	322	497	5,74	7,00	0,32
5,4	251	71	272	5,86	5,80	0,51
5,6	398	1	4	6,38	5,52	0,59
A (P = 0,05)		33	60	0,22	0,44	0,08
Seuil		5,5	5,5	—	5,4	5,4

TABLEAU 45

Régénération de la stabilité structurale d'une rendzine grise d'érosion enrichie en glucose et sulfate d'ammoniaque entre les pF 5,6 et 4,9 (sol RZ).

pF	Tension en atmosphères	Indice d'instabilité S (HENIN)
4,9	79	0,37
5,1	125	0,43
5,4	251	0,63
5,6	398	0,56
A (P = 0,05)		0,08
Seuil		5,2

c) *Cas d'une rendzine grise d'érosion.*

L'application du même protocole expérimental à la rendzine grise d'érosion (RZ) a également entraîné une amélioration de la stabilité structurale nette mais cependant moins spectaculaire que dans les sols précédents. Il s'agit en effet ici d'un sol contenant, contrairement aux autres, une assez grande quantité de carbonate de sodium et présentant, de ce fait, une structure plus stable (tableau 45).

On vient de mettre en évidence, en plus du seuil de prolifération de la microflore fongique et du seuil de démarrage de l'activité biologique mesuré par le dégagement

de CO_2, un nouveau seuil : c'est *le seuil de régénération de la structure.* Il est remarquable de constater que ces trois seuils sont sensiblement placés au même niveau : ils sont en effet compris entre les pF 5,1 et 5,5. Ce niveau est celui de la glucolyse et de l'immobilisation de l'azote minéral par le glucose (chapitre IV, paragraphe B ; chapitre VII, paragraphe A).

Si l'on revient à la notion de groupement physiologique, on peut penser que, dans les conditions expérimentales où nous nous sommes placé ici, c'est la microflore glucolytique qui est responsable de l'amélioration de la stabilité structurale, cette microflore étant constituée essentiellement par les Champignons.

2. — *Régénération par incorporation de feuilles d'Arachide broyées*

Le tableau 46 (3e colonne) montre que le pourcentage d'agrégats stables à l'eau après prétraitement au benzène est sensiblement le même, après une incubation de 6 semaines au pF 4,9, dans le cas de l'enrichissement en feuilles d'Arachide broyées (38,9 p. 100) et dans celui de l'enrichissement en glucose (37,8 p. 100). Mais le seuil de régénération de la stabilité structurale est un peu plus bas dans le premier cas (5,2) que dans le second (5,5).

TABLEAU 46

Influence de différents traitements sur l'évolution de la stabilité structurale — mesurée par le pourcentage d'agrégats stables — d'un sol ferrugineux tropical lessivé mis à l'incubation pendant 6 et 10 semaines à des pF compris entre 5, 6 et 4,9 (sol DH-T).

pF	Tension en atmosphères	Enrichissement en feuilles d'Arachide	Enrichissement en glucose et sulfate d'ammoniaque		Aucun enrichissement (témoin)	
		6 semaines	6 semaines	10 semaines	6 semaines	10 semaines
4,9	79	38,9	37,8	33,4	30,7	28,2
5,1	125	34,3	39,4	34,5	28,7	28,0
5,4	251	32,2	36,9	36,6	31,1	30,6
5,6	398	31,9	30,8	31,6	30,4	30,3
A (P = 0,05)		1,6	1,7	1,5	1,6	0,9
Seuil		5,2	5,5	5,5	—	—

On a pu vérifier que le seuil de régénération de la stabilité structurale résultant de l'incorporation de feuilles d'Arachide est confondu avec le seuil de dégradation de cette matière organique, déterminé par la méthode respirométrique, qui est aussi de 5,2.

3. — *Cas des sols non enrichis*

Dans le cas des sols non enrichis, il n'y a, pour les différents échantillons étudiés, aucune tendance significative d'évolution de la stabilité structurale dans le sens de la régénération ou dans le sens inverse, lorsque la durée d'incubation reste inférieure ou égale à 6 semaines (tableau 43 et tableau 46, 6e colonne).

C. — Dégradation de la stabilité structurale

Les processus de dégradation de la stabilité structurale ne se manifestent, aux faibles humidités, qu'après des temps d'incubation très longs de l'ordre de 10 semaines, ausssi bien dans des échantillons enrichis que dans des échantillons non enrichis.

1. — *Cas des sols enrichis en glucose et sulfate d'ammoniaque*

On a vu que l'enrichissement en glucose et sulfate d'ammoniaque, en favorisant la microflore fongique, améliorait considérablement la stabilité structurale *dans le cas de l'incubation de 6 semaines* adoptée pour les protocoles expérimentaux consacrés à ce problème. Mais, *pour des temps d'incubation plus élevés* (10 semaines), on observe une baisse relative de la stabilité structurale, sans que celle-ci tombe toutefois au-dessous du niveau originel. C'est ainsi qu'au pF 5,1 le pourcentage d'agrégats stables après prétraitement au benzène qui atteint 39,4 p. 100 à la sixième semaine, tombe à 34,5 p. 100 à la dixième semaine (tableau 46, 4e et 5e colonnes).

2. — *Cas des sols non enrichis*

Alors qu'une incubation de l'ordre de 6 semaines à un pF de 5,1 ou 4,9 est pratiquement sans effet sur la stabilité structurale d'un sol ferrugineux tropical lessivé non enrichi (DH-T), une incubation prolongée (10 semaines) entraîne une baisse faible mais significative du pourcentage d'agrégats stables. Celui-ci tombe, en effet, de 30,3 p. 100 à 28,2 p. 100 après une incubation de 10 semaines au pF 4,9, le seuil de signification, pour P = 0,05, étant de 29,4 p. 100 (tableau 46, 7e colonne).

D. — Conditions de l'évolution de la stabilité structurale aux faibles humidités

Aux pF élevés, il y a régénération de la stabilité structurale lorsque les microorganismes peuvent disposer de substances énergétiques xérométabolisables en quantité suffisante.

De même que les seuils d'immobilisation de l'azote minéral, les seuils de régénération de la stabilité structurale sont confondus avec les seuils de dégradation des substances énergétiques mises à la disposition de la microflore tellurique. Ce fait permet de prévoir le niveau des seuils de régénération de la stabilité structurale. Si, par exemple, à la place du glucose ou de feuilles d'Arachide, on utilisait l'amidon ou la cellulose, les seuils de régénération se placeraient au niveau des seuils d'amylolyse et de cellulolyse.

En ce qui *concerne les processus de dégradation de la stabilité structurale*, on a montré qu'aux faibles humidités ils pouvaient coexister avec les processus de régénération, avec toutefois un certain déphasage dans le temps. Ces deux processus antagonistes sont vraisemblablement liés aux processus de minéralisation et d'immobilisation des éléments minéraux dans le sol.

CHAPITRE X

INTERPRÉTATION GÉNÉRALE DES RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

A. — Nature biologique des processus d'évolution de la matière organique du sol aux pF supérieurs a 4,2

Pour chacun des processus examinés au cours de ce travail, on s'est attaché à en démontrer la nature biologique, soit en se basant sur des expériences faisant intervenir la stérilisation ou l'emploi de substances inhibitrices ou antibiotiques, soit, plus généralement, en doublant les analyses chimiques par des numérations de germes ou des mesures de métabolisme respiratoire.

Les résultats des déterminations de seuils par les méthodes respirométriques ont toujours coïncidé de façon satisfaisante avec ceux des méthodes chimiques. La concordance a été parfois moins bonne pour les méthodes de numération, pour différentes raisons dont certaines sont liées au principe même de la méthode et d'autres sont simplement d'origine technique.

En ce qui concerne les premières, on a déjà noté, à la suite de nombreux auteurs dont Burcik, Pochon et de Barjac (19, 99), que la numération des germes vivants ne pouvait donner qu'une image imparfaite de l'activité biologique, de même qu'elle reflète avec imprécision les phénomènes de croissance (90). D'autre part, les numérations n'ont, en général, pu être effectuées sur des populations parvenues au même stade de développement. Si l'on considère, en effet, une gamme d'échantillons de sol à différentes humidités, les numérations faites à un instant donné peuvent correspondre à la phase de croissance dans le cas des pF élevés, alors que, pour les pF plus bas, l'on se trouve dans la période de décroissance ou de lyse des cellules microbiennes.

En ce qui concerne les difficultés d'ordre technique, on soulignera encore l'importance de l'erreur expérimentale, commune à toutes les méthodes de numération qui a eu pour effet d'accroître le décalage des seuils vers les humidités élevées.

Quoiqu'il en soit et, malgré leurs défauts, les méthodes de numération se sont révélées très utiles dans le cadre de notre travail, car elles nous ont permis en particulier de prouver le rôle des microorganismes dans les processus d'évolution de la matière organique aux faibles humidités. Ce rôle pouvait, a priori, se concevoir à la suite des travaux antérieurs et notamment ceux de Burcik ; mais il était nécessaire de le vérifier systématiquement.

B. — Seuils

Le premier problème à résoudre était de préciser le pF limite ou pF de démarrage de l'activité biologique des différents groupements physiologiques de microorganisnismes. C'est ce qu'on s'est attaché à faire au cours de notre étude expérimentale dont

les principaux résultats ont été regroupés sur la figure 22. Ce diagramme fait ressortir les niveaux :

a) des seuils relatifs aux processus de minéralisation et d'immobilisation.

b) des seuils de régénération de la structure.

c) des seuils de prolifération de certains microorganismes.

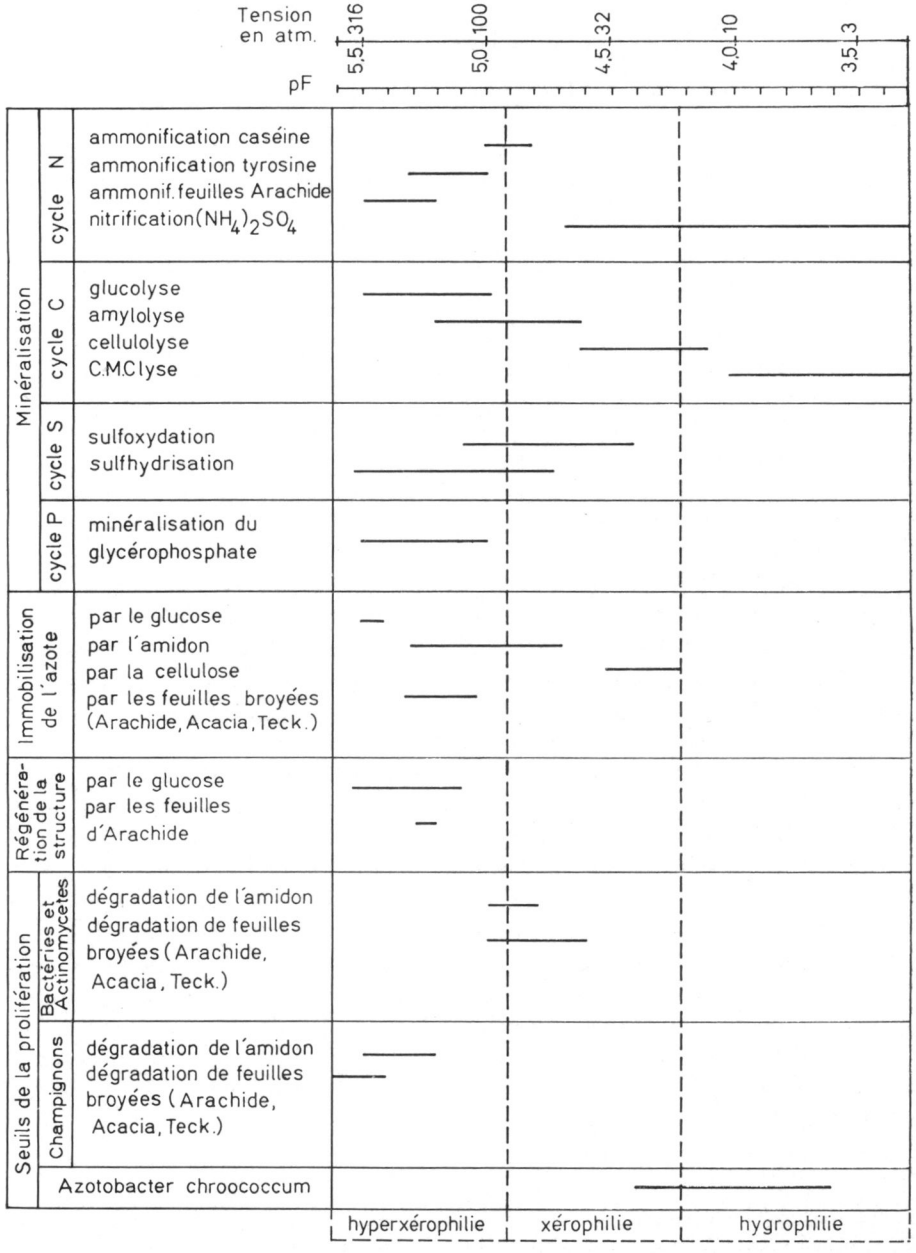


FIG. 22. — *Diagramme des seuils des différents groupements de microorganismes intervenant dans les processus de minéralisation, d'immobilisation ou d'évolution de la stabilité structurale.*

Ces résultats confirment et précisent les deux idées qui se dégageaient des travaux antérieurs sur le comportement de la microflore du sol aux humidités voisines ou inférieures au point de flétrissement permanent, à savoir :

a) que de très nombreux microorganismes peuvent se développer et continuer à intervenir dans les processus de minéralisation et de synthèse, même lorsque, par suite du dessèchement du sol, les plantes supérieures ont atteint le point de flétrissement permanent.

b) que les exigences hydriques des différents groupements physiologiques de microorganismes sont extrêmement variables ,les seuils de démarrage s'échelonnant entre le pF 5,5 et le pF 3,6 et atteignant même des pF encore inférieurs.

1. — *Classification des groupements physiologiques des microorganismes d'après leurs exigences hydriques*

Si l'on trace dans la figure 22 deux droites horizontales passant, l'une par le pF 4,9, l'autre par le pF 4,2, on délimite trois zones auxquelles correspondent trois catégories écologiques de microorganismes :

a) *Les microorganismes hyperxérophiles.*

Ce sont les germes dont le seuil est compris entre 5,5 set 4,9. La limite supérieure atteint parfois même le pF 5,6. Rentrent dans cette catégorie, la plupart des microorganismes responsables :

— de l'ammonification de la tyrosine ;
— de la glucolyse ;
— de la sulfhydrisation ;
— de la minéralisation du glycérophosphate ;
— de la dégradation de substances végétales complexes (feuilles d'Arachide, feuilles de Teck, par exemple).

et une partie des microorganismes responsables :

— de l'amylolyse ;
— de l'ammonification de la caséine.

Les microorganismes intervenant à ces très faibles humidités sont surtout des Champignons.

b) *Les microorganismes xérophiles.*

Ce sont les germes dont le seuil est compris entre 4,9 et 4,2. Rentrent dans cette catégorie, la plupart des microorganismes responsables :

— de la dégradation de la cellulose ;
— de la sulfoxydation ;

et une partie des microorganismes responsables :

— de l'amylolyse ;
— de l'ammonification de la caséine ;
— de la nitrification du sulfate d'ammoniaque.

Alors que les Champignons constituent la majorité des microorganismes intervenant aux pF supérieurs à 4,9, les Bactéries et Actinomycètes commencent à être actifs aux pF inférieurs à 4,9.

c) *Les microorganismes hygrophiles.*

Ce sont les germes dont le seuil est inférieur à 4,2. Rentrent dans cette catégorie la plupart des microorganismes responsables :

— de la dégradation de la carboxyméthylcellulose ;

— de la fixation de l'azote atmosphérique (*Azotobacter chroococcum*).

et une partie des microorganismes responsables :

— de la nitrification du sulfate d'ammoniaque.

On vient de voir qu'il existe des groupements de microorganismes dont les exigences sont intermédiaires entre celles des trois catégories définies ci-dessus. C'est, par exemple, le cas des germes amylolytiques ou des germes ammonifiant la caséine qui font la transition entre les germes hyperxérophiles et les germes xérophiles. Quant aux microorganismes intervenant dans la minéralisation de l'azote et du carbone organiques préexistant dans le sol, leurs exigences hydriques sont très variables et ils sont représentés dans les trois catégories écologiques.

En ce qui concerne les microorganismes responsables des processus d'*immobilisation de l'azote minéral* ou de *régénération de la stabilité structurale*, on a vu que leurs seuils sont, en fait, confondus avec les seuils de dégradation des substances énergétiques correspondantes (glucose, amidon, cellulose, feuilles broyées...) Il est donc facile de les placer dans leur catégorie écologique.

On a signalé incidemment au chapitre V paragraphe C, le cas des germes sulfhydrisants semi-anaérobies qui ne se développent qu'à des humidités très élevées, en liaison avec les phénomènes d'engorgement des sols. Cet exemple prouve qu'il existe des catégories de germes aux exigences hydriques encore plus élevées que celles des germes hygrophiles. Il n'en a évidemment pas été question ici, car les microorganismes présentant de telles exigences écologiques sont totalement étrangers aux processus d'évolution aux faibles humidités qui font l'objet du présent mémoire. Lorsqu'on pénètre dans la zone des fortes humidités, le facteur eau n'intervient d'ailleurs pas seulement par lui-même mais aussi en modifiant le potentiel redox du sol.

2. — *Facteurs influant sur le niveau des seuils*

a) *Nature de la substance métabolisable.*

Le niveau des seuils est toujours sous la dépendance de la nature de la substance métabolisable qui se trouve à la disposition des microorganismes telluriques. C'est ainsi qu'on mis en évidence des seuils d'ammonification très distincts suivant que l'on avait incorporé au sol de la tyrosine, de la caséine ou des feuilles d'Arachide (chapitre III, par. I). En ce qui concerne les seuils de dégradation des débris végétaux, tels que les feuilles d'essences forestières, ils sont vraisemblablement fonction de la teneur et de la nature des matières hydrosolubles (45, 73) qu'ils renferment. En fait, la nature de la substance métabolisable n'intervient pas directement mais par l'intermédiaire des groupements physiologiques spécialisés correspondants qui comprennent un nombre variable d'espèces dont les moins exigeantes vis-à-vis du facteur eau règlent, en définitive, le niveau des seuils.

b) *Type pédologique.*

Il est de nombreux cas où le niveau des seuils est visiblement lié au type pédologique considéré. C'est ainsi que les seuils de nitrification du sulfate d'ammoniaque

s'échelonnent, suivant les sols, entre les pF 4,7 et 3,6 et peuvent descendre encore à des pF inférieurs (tableau 22). Il en est de même pour les seuils de disparition de la tyrosine (tableau 20).

Cette influence du type pédologique s'explique par le fait que les espèces microbiennes, composant le groupement physiologique spécialisé dans une certaine fonction, peuvent varier d'un sol à l'autre.

Il y a tout lieu de penser que la composition spécifique de la microflore d'un sol donné joue un rôle d'autant plus important dans la détermination du niveau du seuil que sa spécialisation est puis prononcée. Le nombre d'espèces microbiennes intervenant alors est très réduit — il peut même n'y en avoir qu'une seule — et ce sont les exigences écologiques propres à cette ou ces espèces qui imposent le niveau du seuil.

En fait, à part la fixation de l'azote atmosphérique, la nitrification et, dans une moindre mesure, la sulfoxydation, les différentes fonctions étudiées ici résultent de la somme des interventions d'espèces microbiennes *ubiquistes*, c'est-à-dire présentes dans la plupart des sols. C'est ce qui explique qu'on ait pu souvent déterminer des seuils indépendamment des types pédologiques ; le cas le plus typique est celui du seuil de glucolyse qui est pratiquement le même dans tous les sols. En ce qui concerne la minéralisation de l'azote ou du carbone organiques préexistant naturellement dans le sol, les seuils apparaissent comme très étroitement liés aux types pédologiques, ce qui se conçoit aisément puisqu'à chaque type de sol en équilibre climacique correspond une matière organique d'une composition donnée à laquelle est adaptée une microflore particulière. Cette microflore a été qualifiée par WINOGRADSKY *d'autochtone* par opposition à la *microflore zymogène* — ou *watchful-waiting microflora* de CONN — qui ne se développe que sous l'influence de traitements tels que l'addition de matière organique, la fertilisation, l'aération, etc. (123).

C. — CONSÉQUENCES DE LA DISPARITÉ DES EXIGENCES HYDRIQUES DES PLANTES SUPÉRIEURES ET DES MICROORGANISMES TELLURIQUES

Il est admis que les exigences minima en eau de nombreuses plantes se situent aux environs du pF 4,2, pF au niveau duquel elles atteignent le point de flétrissement permanent. Lorsqu'en se desséchant le sol dépasse le pF 4,2, les végétaux supérieurs cessent d'absorber les éléments nutritifs tels que les ions nitrate, sulfate, ammonium, etc. Mais la microflore responsable de la minéralisation de l'azote, du carbone et du phosphore organiques reste active, de sorte qu'il y a accumulation dans le sol des produits de cette minéralisation. Inversement, si les conditions sont défavorables à la minéralisation, il peut y avoir immobilisation de ces éléments. En d'autres termes, les plantes se retirant momentanément du cycle biologique du sol, les microorganismes sont seuls à intervenir.

L'accumulation préférentielle de l'azote ammoniacal dans le sol, dans sa phase avancée de dessèchement, a été signalée par de nombreux auteurs sans qu'une explication satisfaisante en ait été donnée. Cette accumulation nous apparaît comme la conséquence logique du décalage des seuils de l'ammonification et de la nitrification (chapitre III, paragraphe I).

On retrouve un phénomène analogue quand les processus d'immobilisation et de minéralisation sont déphasés. C'est ainsi que, si le sol se trouve à un pF compris

entre 5,1 et 5,3, l'humidité est suffisante pour le développement de la microflore ammonifiante mais insuffisante pour celui de la microflore cellulolytique. Il peut y avoir alors accumulation d'azote minéral. Mais lorsque l'humidité s'élève, les germes cellulolytiques rentrent en jeu et immobilisent pour leurs besoins, une partie importante de l'azote minéral libéré.

On a vu que les courbes de minéralisation, en fonction du pF, de la tyrosine, des feuilles d'Arachide broyées ou même de la matière organique préexistant dans le sol, ainsi que les courbes de minéralisation de glycérophosphate présentaient souvent un maximum suivi d'un minimum placé au voisinage du pF 4,2 (figures 13, 14 et 18). L'apparition du maximum correspond à l'existence de conditions plus favorables aux microorganismes responsables de la minéralisation de l'azote ou du phosphore, qu'aux microorganismes responsables de l'immobilisation de ces éléments. Lorsque le pF diminue, les conditions hydriques restent favorables pour les premiers germes mais le deviennent également pour les germes responsables de l'immobilisation (germes cellulolytiques, hemicellulolytiques, carboxyméthylcellulolytiques, etc.) qui, plus dynamiques, exercent une concurrence telle que les produits minéralisés sont réorganisés et la courbe de minéralisation présente alors un minimum très caractérisé.

Lorsque l'humidité croît encore, les phénomènes de minéralisation peuvent à nouveau l'emporter sur les phénomènes d'immobilisation.

Il est probable que l'influence élective du pF est accentuée par le fait que l'activation ou l'inactivation de certains microorganismes contribueraient à stimuler ou inhiber l'activité d'autres microorganismes.

D. — Intensité des phénomènes de minéralisation et d'immobilisation aux faibles humidités

La détermination du seuil ne suffit pas à caractériser le comportement d'un groupement de microorganismes. Il est nécessaire de faire intervenir, en outre, la notion d'*intensité*. En effet, un groupement de microorganismes peut être caractérisé par un seuil élevé mais ne faire preuve que d'une activité réduite et inversement. C'est ainsi que, dans le sol TH, le seuil d'ammonification de la tyrosine se situe au pF 5,2, alors que celui de la caséine est seulement de 5,0. La microflore ammonifiant la tyrosine est donc moins exigeante en eau que la microflore ammonifiant la caséine et l'on pourrait s'attendre, dans ces conditions, à ce que l'intensité de l'ammonification soit plus élevée dans le cas de la tyrosine que dans celui de la caséine. C'est bien ce que l'on constate aux faibles humidités ; mais quand le pF s'élève, la situation se renverse. Au pF 4,2, la proportion de caséine ammonifiée est très supérieure à celle de la tyrosine (figures 12 et 13).

Comment exprimer l'intensité du phénomène de minéralisation ?

Le plus simple est de la représenter par le pourcentage de l'élément minéralisé ou immobilisé à un pF donné par rapport à la quantité incorporée au sol. Par exemple, dans le sol TH, où l'on a apporté 200 p.p.m. d'azote organique sous forme de caséine ou de tyrosine, le pourcentage d'azote organique minéralisé à la quatrième semaine au pF 4,5, compte tenu du témoin, est de :

— 59 p. 100 pour la caséine ;

— 25 p. 100 pour la tyrosine.

Au pF 4,2 on a :

— 56 p. 100 pour la caséine ;
— 15 p. 100 pour la tyrosine.

Cette façon de procéder est discutable car le pourcentage ainsi calculé dépend, dans une certaine mesure, de la quantité d'azote organique apporté. Aussi a-t-on pensé à exprimer ce pourcentage par rapport aux résultats obtenus au pF 2,7. Si l'on applique cette méthode à l'exemple donné ci-dessus, on trouve les pourcentages suivants pour le pF 4,5 :

— 103 p. 100 pour la caséine ;
— 50 p. 100 pour la tyrosine.

Au pF 4,2 on a :

— 124 p. 100 pour la caséine ;
— 29 p. 100 pour la tyrosine.

Malheureusement l'intensité de la minéralisation ou de l'immobilisation varie parfois considérablement d'un sol à l'autre, même si les conditions expérimentales restent identiques. Le critère intensité n'a donc pas la valeur du critère seuil puisqu'il est, plus encore que ce dernier, soumis à l'influence de la nature du type pédologique. On aura cependant intérêt à tenir compte de son ordre de grandeur.

CHAPITRE XI

ÉVOLUTION DE L'ACTIVITÉ BIOLOGIQUE AU COURS DU DESSÈCHEMENT DU SOL EN PLACE

L'étude expérimentale dont on a exposé les résultats au cours des chapitres précédents a prouvé que l'activité biologique pouvait se prolonger, pour certains groupements physiologiques, jusqu'à un pF de 5,5 (et exceptionnellement 5,6). Au-delà de cette valeur, les phénomènes évolutifs apparaissant dans le sol sont exclusivement de nature physico-chimique (effet DROUINEAU, effet BIRCH). On ne reviendra pas sur ce problème, qui a été examiné rapidement au chapitre III, paragraphe J, car il sort du cadre du présent travail.

La question essentielle qui se pose est de savoir combien de temps, et dans quelles conditions, le pF du sol en place se trouve compris dans l'intervalle 5,5-4,2. On vient de rappeler que le pF 5,5 constituait la limite de l'activité microbienne du côté des faibles humidités. Quant au pF 4,2, il correspond au point de flétrissement, c'est-à-dire à la limite extrême de l'activité physiologique de la plupart des plantes supérieures.

Dans l'intervalle 5,5-4,2, l'eau du sol peut avoir deux origines :

a) il peut s'agir — et c'est le cas le plus fréquent — de la réserve d'eau d'origine pluviale qui reste dans le sol après les pluies et dont le stock s'épuise peu à peu au cours de la phase de dessèchement ;

b) il peut s'agir d'apports secondaires d'eau pendant la saison sèche, résultant de la condensation ou de l'absorption directe de la vapeur d'eau.

On examinera donc successivement les conséquences, sur le plan biologique, du dessèchement du sol en place (chapitre XI), et des apports secondaires d'humidité au cours de la saison sèche (chapitre XII).

A. — OBSERVATIONS ANTÉRIEURES CONCERNANT L'ÉVOLUTION AUX FAIBLES HUMIDITÉS DE LA MATIÈRE ORGANIQUE DES SOLS EN PLACE

On énumérera rapidement ces différentes observations, d'ailleurs assez disparates, en essayant, pour chacune d'elles, d'en donner une interprétation à la lumière des résultats de nos travaux.

a) *L'accumulation de l'azote minéral* au cours de la saison sèche a été notée par de nombreux auteurs en zone tropicale sèche notamment par ROBINSON et SIMPSON en Afrique Orientale, et JONES au Soudan (65, 100, 111). Elle s'explique, le plus souvent, par le fait que l'ammonification est encore élevée lorsque le sol est relativement sec (pF compris entre 4,2 et 4,9) et que, dans certaines conditions, elle n'est pas négligeable, bien que faible, entre les pF 4,9 et 5,4.

JONES signale qu'au Soudan « l'accumulation d'azote nitrique au mois de janvier (soit environ trois mois après l'arrêt des pluies) prouve qu'une certaine forme d'activité s'exerce dans le sol en saison sèche » (65). Il est probable que ce sol qui se rapprocherait, d'après la description qu'en fait l'auteur, des argiles noires tropicales de l'Ouest africain, possèderait, comme elles, une microflore xérophile capable de nitrifier à des pF relativement élevés de l'ordre de 4,6 ou même plus.

Cette accumulation de l'azote minéral dans les sols en saison sèche explique, tout au moins en partie :

— la rapidité du départ végétatif herbacé dès les premières pluies qui a frappé tous les voyageurs circulant en zone tropicale à cette époque ;

— la productivité relative des sols à faibles réserves organiques et minérales de la zone à Arachide de l'Ouest africain.

Bien entendu, les processus de nature biologique conduisant à l'accumulation de l'azote minéral peuvent coexister avec les phénomènes de remontée des nitrates du sous-sol qui sont parfois importants dans les sols tropicaux (121).

b) *L'accumulation préférentielle de l'azote ammoniacal par rapport à l'azote nitrique aux pF supérieurs à* 4,2 est un fait que nous avons déjà suffisamment commenté pour qu'il soit nécessaire d'y revenir (chapitre III, paragraphe I).

c) VIDAL, en se basant sur l'évolution du rapport C/N de la matière végétale enfouie, a démontré qu'*en zone tropicale sèche l'engrais vert pouvait se décomposer, au moins partiellement, malgré un enfouissement tardif en fin de saison des pluies.* Les chiffres publiés par cet auteur sont relatifs à une expérience conduite au Centre de Recherches agronomiques de Bambey, Sénégal, à la saison des pluies 1959. Au moment de l'enfouissement « le rapport C/N s'établissait à 44,9 dans le cas du mil et à 64,4 dans le cas d'une végétation naturelle. Après enfouissement, la pluviométrie enregistrée a atteint 30 mm seulement. Le 30 mars, soit au 6e mois de la saison sèche, on a soigneusement isolé du sillon d'enfouissement la matière végétale dont les différents organes étaient encore identifiables, mais présentaient des signes évidents d'altération confirmés par les rapports C/N qui étaient tombés à 25,3 dans le cas du mil et à 31,2 dans le cas de la végétation naturelle. Tout ceci prouve que les phénomènes biologiques ne sont pas stoppés en cours de saison sèche malgré la faible humidité des horizons superficiels (18) ».

d) Les agronomes ont, depuis longtemps, noté l'importance du facteur eau dans *la décomposition des pailles* dans le sol. C'est ainsi que, si la pluviosité est déficiente on peut retrouver des pailles non encore décomposées huit à dix mois après l'enfouissement. Il est vraisemblable qu'alors le seuil de dégradation des pailles dans le sol a été très nettement dépassé (110).

e) On a remarqué aussi que les phénomènes d'*immobilisation de l'azote* étaient sous la dépendance de l'humidité du sol. D'après BARBIER cité par SIMON, « selon les circonstances météorologiques, la paille peut se décomposer plus ou moins vite et l'on risque, soit la verse, si l'azote temporairement immobilisé par la paille se reminéralise assez tôt, soit le déficit de rendement si cet azote se réminéralise trop tard » (109).

f) *La pourriture des semences au champ*, lorsque les précipitations sont insuffisantes pour assurer une germination normale, a été signalée dès 1932 par BŒUF. « Si la terre est très sèche, le grain se conserve parfaitement dans le sol ; si la semence trouve à sa disposition un peu d'humidité provenant, soit des couches plus profondes

maintenues humides par une excellente préparation de la jachère, soit de pluies légères insuffisantes pour provoquer la germination (1), elle peut moisir ou pourrir sans pousser. Cet accident a nécessité certaines années à automne sec le réensemencement de surfaces importantes, plus souvent dans les semis de blé dur que dans les semis de blé tendre, sans doute parce que ces derniers blés sont moins fêlés au battage que les blés durs et présentent moins de blessures constituant des portes ouvertes aux micro-organismes du sol » (16). L'apparition de cette pourriture est due au fait que l'humidité du sol était très largement suffisante pour le développement de la microflore responsable de la dégradation des substances amylacées contenues dans les grains. On se souvient de ce que le seuil de l'amylolyse est situé entre les pF 4,9 et 5,2. Mais cette humidité était insuffisante pour assurer la germination qui exige un pF inférieur à 4,2.

g) *L'acidification des sols à sulfures*, lors de leur assèchement par drainage, est partiellement imputable à la prolifération des microorganismes sulfoxydants dont on connaît les faibles exigences sur le plan hydrique (54).

h) *La régénération de la stabilité structurale au début de la saison sèche* mise en évidence par HENIN sous climat tempéré (55) peut s'expliquer, tout au moins partiellement, par la prédominance, à cette époque de l'année, des processus de régénération de la structure sur les processus de dégradation.

i) Bien qu'il ne s'agisse pas d'une observation de terrain, il est intéressant de signaler ici que, bien souvent, le degré hygrométrique de l'atmosphère atteint des valeurs telles que *la matière organique des échantillons évolue au cours du stockage.* C'est ainsi qu'on a observé des accroissements considérables des teneurs en azote minéral, ou même une modification de la stabilité structurale, dans des échantillons conservés plusieurs mois au laboratoire sans prendre de précautions suffisantes. La conservation de ces échantillons n'est assurée correctement que si l'on fait en sorte que leur pF soit constamment supérieur à au moins 5,6. L'enrichissement bien connu en nitrates des échantillons de terre au cours de leur séchage est à rapprocher de cette dernière observation.

B. — VARIATIONS DU pF DANS LES SOLS AU COURS DE LA SAISON SÈCHE

Il ne pouvait être question ici d'effectuer une étude de la variation du pF dans les sols au cours de la saison sèche qui a été faite, par ailleurs, par des physiciens du sol. Mais il nous a semblé intéressant de rappeler les résultats obtenus récemment par CHARREAU dans deux sols du Centre de Recherches agronomiques de Bambey, Sénégal (25).

Le premier sol est un sol ferrugineux tropical faiblement lessivé sur sables, connu sous le nom vernaculaire de Dior. Le deuxième est un sol à hydromorphie temporaire de surface sur sables et marno-calcaires, connu sous le nom vernaculaire de Dek ; il s'agit d'un terme de passage entre le sol Dior et un autre sol utilisé dans notre étude expérimentale sous la référence BAN.

Les courbes d'évolution du pF en fonction du temps ont été établies pendant la saison sèche 1959-1960. Du 24 septembre 1959 — date de la dernière pluie — à la

(1) Cette humidité peut également provenir de la condensation, sur les parties supérieures du sol refroidies au cours de la nuit, de l'eau distillée de bas en haut du profil (28, 29).

mi-juin 1960, les relevés des profils hydriques ont été faits tous les quinze jours au début de la période sèche, puis tous les mois. Les figures 23 et 24 montrent des différences entre le comportement du sol Dior et celui du sol Dek. Le dessèchement en sol Dior est sensiblement plus rapide. A la date du 15 mai, le pF 4,2 se situe à une profondeur moyenne de 70 cm en sol Dek, contre 90 cm en sol Dior. Si l'on suit une des courbes de pF, par exemple celle du pF 4,2, on voit que la variation avec la profondeur est très rapide au début, jusqu'au mois de décembre ; ensuite le mouvement se ralentit » (25).

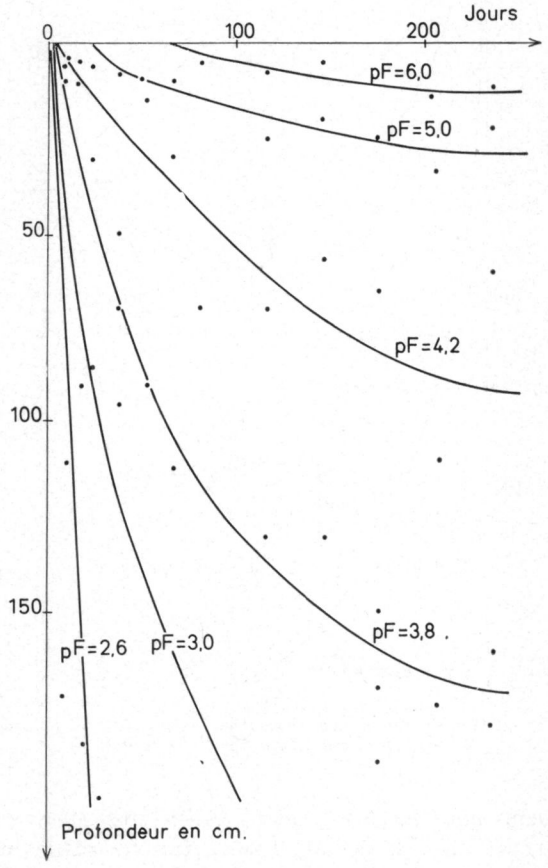


FIG. 23. — *Évolution du pF d'un sol DIOR au cours de la saison sèche. En abscisse : temps exprimé en jours à partir de l'arrêt des pluies. En ordonnée : profondeur exprimée en cm* (Charreau).

Si l'on se place sur le plan biologique, c'est l'évolution des horizons supérieurs (0 à 25 cm) qui présente le plus d'intérêt, puisque la microflore tellurique y est plus dense et l'activité potentielle, mesurée par le dégagement de CO_2, y est plus intense. Or les courbes d'évolution du pF en fonction du temps, aussi bien dans le cas du sol Dior que dans celui du sol Dek, sont telles qu'à 25 cm de profondeur, le sol est encore au pF 5,0, 200 jours après l'arrêt des pluies. L'on conçoit fort bien que, dans ces conditions, une partie de la microflore du sol puisse continuer à rester active pendant la la saison sèche.

S'il existe relativement peu de résultats concernant l'évolution du pF en zone tropicale sèche, on sait que, par contre, de nombreux travaux ont été effectués dans ce domaine en zone méditerranéenne notamment. Nous signalerons, entre autres, ceux de DROUINEAU et de BEAUCORPS (10,40). Bien que ces études sortent du cadre

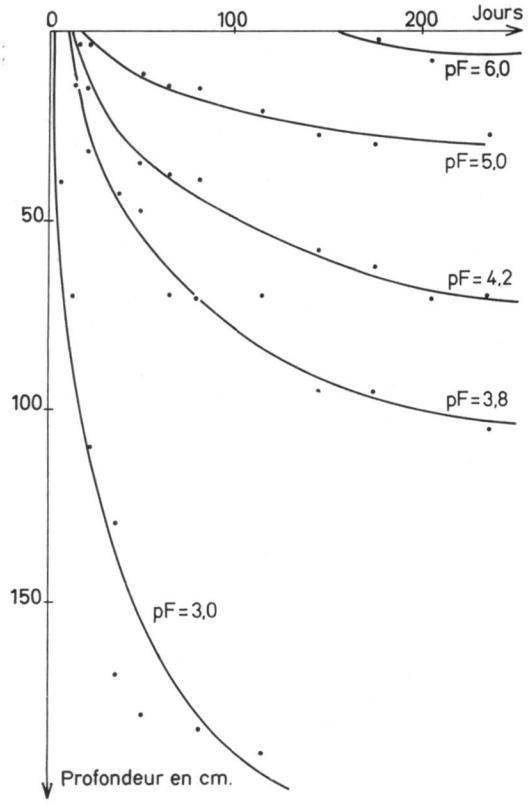


FIG. 24. — *Même protocole expérimental que dans le cas de la figure* **23**, *mais appliqué au sol DEK (Charreau).*

géographique où nous nous sommes placé, il est intéressant de constater que, dans les régions méditerranéennes, le pF des sols se trouve également compris pendant plusieurs mois dans l'intervalle 4,2-5,5 et il est vraisemblable que les processus biologiques qui s'y déroulent sont très voisins de ceux que l'on a mis en évidence en zone tropicale sèche et en zone subaride.

C. — ÉTUDE DE QUELQUES PROCESSUS D'ÉVOLUTION DE LA MATIÈRE ORGANIQUE DANS DES SOLS EN PLACE

Nous avons tenu à vérifier nous-même, dans des sols en place, certains processus évolutifs et notamment l'accumulation d'azote minéral et la diminution de la teneur en carbone minéralisable rémanent.

1. — *Technique expérimentale*

Les mesures effectuées dans les sols en place, pour l'étude des variations saisonnières, sont souvent entachées d'une erreur importante imputable en grande partie à un échantillonnage insuffisamment représentatif. C'est pourquoi nous avons mis au point la technique suivante qui, bien que critiquable par le fait qu'elle perturbe assez profondément le sol, s'est imposée, car elle réduit considérablement l'erreur expérimentale lors de l'étude des variations saisonnières.

Elle consiste à homogénéiser, dans chaque microparcelle à étudier, le sol de l'horizon supérieur et à le répartir, à l'aide d'un échantillonneur-diviseur, en autant de sacs de tulle de nylon à mailles de 0,3 à 0,4 mm que l'on désire faire de prélèvements au cours de l'année. Ces sacs, cousus avec du fil de nylon, sont replacés dans l'horizon d'où ils proviennent et recouverts avec la terre qui n'a pas été mise en sac. Pour chacun des trois sols étudiés, on a effectué de 6 à 10 répétitions.

Le premier d'entre eux est un sol d'argile noire tropicale sous jachère situé à Pout (centre-ouest du Sénégal). Les deux autres sont des sols faiblement ferrallitiques à tendance hydromorphe sous peuplement de Teck, situés, l'un en forêt classée des Bayottes, l'autre dans l'ancienne pépinière de Bignona (Basse-Casamance).

2. — *Accumulation de l'azote minéral*

Dans le sol d'argile noire de Pout, l'accroissement de la teneur en azote minéral global ($N\text{-}NH_3 + N\text{-}NO_3$) est hautement significatif (tableau 47 et graphique du haut de la figure 25).

TABLEAU 47

Evolution au début de la saison sèche de quelques caractéristiques d'un sol d'argile noire tropicale sous jachère ancienne (Pout).

Caractéristiques étudiées	14-10-59	30-10-59	25-11-59	17-12-59	8-1-60	A(P = 0,05)
Humidité { H %	8,7	6,9	5,1	4,4	3,7	0,8
Humidité { pF	—	3,8	4,5	4,9	5,2	0,4
Azote minéral global p.p.m.	2,7	3,9	5,0	4,5	5,8	2,4
Azote minéral global + azote minéralisable p.p.m.	15,5	14,3	15,0	17,8	22,2	2,8
Dégagement potentiel de CO_2 en mg/100 g de sol/7 jours	25,0	19,7	19,8	20,2	22,0	1,7
Saccharase	1 182	1 245	1 385	1 231	1 046	159
pH	6,65	6,70	6,68	6,44	6,42	0,15

Le pF a été calculé à partir de l'équation : $pF = -0{,}44\ H + 6{,}8$.
Le *taux de saccarase* est exprimé par le nombre de mg de sucres réducteurs provenant du dédoublement de 10 g de saccharose sous l'action de l'enzyme contenu dans 100 g du sol étudié.

Les résultats obtenus dans les sols faiblement ferrallitiques de Basse-Casamance (tableau 48 et graphique du milieu de la figure 25) confirment les observations faites à Pout, avec un décalage dans le temps dû à ce que, la saison des pluies étant plus

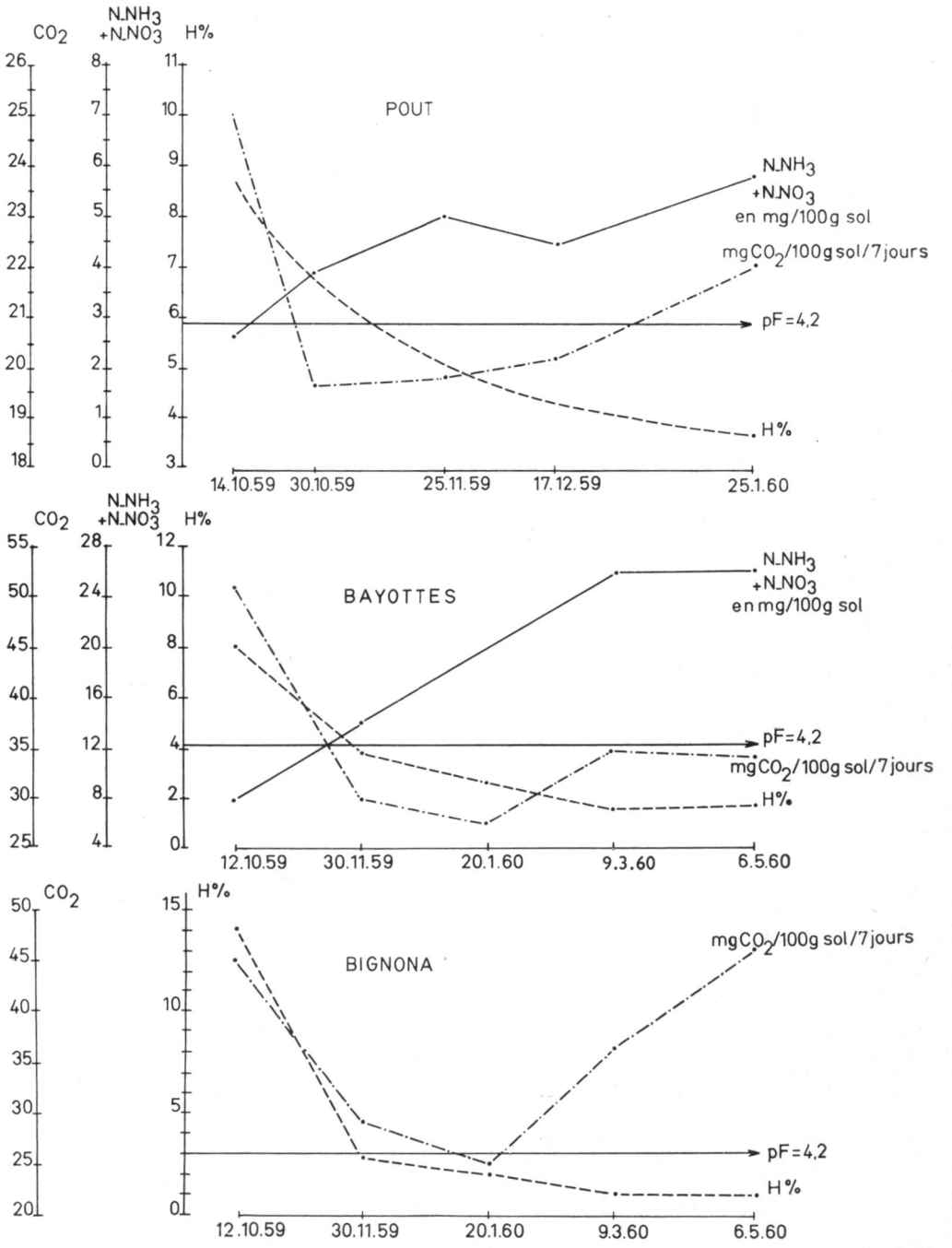


FIG. 25. — *Évolution, au début de la saison sèche, de la teneur en azote minéral global* ($N\text{-}NH_3 + N\text{-}NO_3$), *en carbone minéralisable et en eau de 3 sols en place. De haut en bas :*

sol d'argile noire tropicale de Pout (centre-ouest du Sénégal) ;
sol faiblement ferrallitique des Bayottes (Basse-Casamance) ;
sol faiblement ferrallitique de Bignona (Basse-Casamance).

longue en Basse-Casamance qu'au centre-ouest du Sénégal (Pout), le dessèchement est plus tardif.

A la fin du troisième mois de saison sèche à Pout (17 décembre 1959), le pF du sol était approximativement de 4,9 ; au début du quatrième mois de saison sèche, aux Bayottes et à Bignona (20 janvier 1960), les pF étaient respectivement de 4,6 et 4,8. On sait que ces pF autorisent encore une activité ammonifiante importante, alors que l'activité cellulolytique est nulle ou très réduite et que l'absorption des éléments minéraux par les plantes supérieurs a cessé. Cette triple condition est, on l'a vu plus haut, particulièrement favorable à l'accumulation d'azote minéral.

TABLEAU 48

Evolution au cours de la saison sèche de quelques caractéristiques de deux sols faiblement ferrallitiques sous teckeraie (Basse Casamance).

Forêts	Caractéristiques étudiées	12-10-1959	30-11-1959	20-1-1960	9-3-1960	6-5-1960	A(P=0,05)
Bayottes	Humidité p. 100.....	8,0	3,8	2,6	1,6	2,8	0,9
	Azote minéral global en p.p.m.....	7,8	14,0	—	26,2	25,7	10,9
	Dégagement potentiel de CO_2 en mg/100 g de sol/7 jours	52,2	29,7	25,5	34,8	34,3	6,2
Bignona	Humidité p. 100.....	14,3	2,7	2,0	0,9	0,8	2,0
	Dégagement potentiel de CO_2 en mg /100 g de sol/7 jours.....	45,0	27,8	25,0	36,7	46,8	11,8

Le pourcentage moyen d'humidité au point de flétrissement, aux Bayottes, est égal à 4,2 ± 0,3 ; à Bignona, il est égal à 3,0 ± 0,3.

L'humidité plus élevée observée le 6 mai 1960, aux Bayottes, correspond au début de la saison des pluies dans cette zone.

3. — *Diminution de la teneur du sol en carbone minéralisable*

Par *teneur du sol en carbone minéralisable* ou *taux de dégagement potentiel de* CO_2 d'un échantillon de sol, nous entendons le dégagement de CO_2 de cet échantillon réhumidifié au laboratoire de façon à amener son pF à 2,7 (humidité équivalente) et mis à l'incubation pendant 7 jours à 30°C. Ce dégagement de CO_2 est exprimé en mg de CO_2 pour 100 g de sol sec à l'air.

Les courbes de teneur du sol en carbone minéralisable représentées sur la figure 25 sont typiques de tous les sols des pays de l'Ouest africain à saison sèche caractérisée. Ces courbes comportent ,au début de la saison sèche, une phase de décroissance plus ou moins rapide, suivie d'une phase ascendante correspondant à la deuxième partie de la saison sèche.

a) *Phase de décroissance de la teneur du sol en carbone minéralisable*

Dans le cas du sol de Pout, la chute de la teneur en carbone minéralisable s'arrête dès le 30 octobre. En Basse-Casamance, aussi bien aux Bayottes qu'à Bignona, le phénomène se prolonge jusqu'en fin janvier car le dessèchement du sol est beaucoup plus progressif qu'à Pout (figure 25).

La phase de décroissance de la teneur du sol en carbone minéralisable, apparaissant dès la fin de la saison des pluies, s'explique par l'arrêt de la reconstitution des substances carbonées facilement fermentescibles, alors que la microflore dégradant ces substances dispose encore d'une humidité suffisante pour subsister et poursuivre son activité minéralisante.

b) *Phase d'accroissement de la teneur du sol en carbone minéralisable.*

Plus ou moins rapidement, suivant le type de sol et le climat, on observe un accroissement de la teneur du sol en carbone minéralisable, lié :

— à une augmentation de la teneur du sol en azote ammoniacal par voie biologique ou physico-chimique (effet DROUINEAU) ;

— à une modification de la structure de la matière organique (effet BIRCH)

— à une stérilisation partielle, qui, tout en détruisant certains microorganismes, en épargne d'autres parmi lesquels se trouvent vraisemblablement les germes responsables de la dégradation des substances carbonées facilement fermentescibles, qui, lors de la réhumidification au laboratoire, peuvent se multiplier sans craindre une concurrence gênante.

Ces variations de la teneur du sol en carbone minéralisable ont été retrouvées dans des types de sol très différents ; elles sont caractéristiques de toutes les régions présentant une saison sèche assez longue.

4. — *Autres modifications des caractéristiques des sols au cours de la saison sèche*

Outre les phénomènes évolutifs majeurs qu'on vient de mentionner, le tableau 47 met en évidence un accroissement significatif du taux de saccharase (60) et une diminution significative du pH au début de la saison sèche. Il n'a pas été possible de donner une interprétation définitive de ces modifications. On peut toutefois penser que l'accroissement du taux de saccharase est dû à la libération, dans le sol, d'enzymes provenant de la lyse des cellules microbiennes détruites en grand nombre au cours du dessèchement.

D'autres déterminations ont été effectuées. Elles ont porté sur les points suivants :

— densité des *Azotobacter chroococcum* ;

— densité des germes nitreux ;

— densité des germes cellulolytiques ;

— teneur en phosphore assimilable TRUOG.

Mais l'analyse statistique des résultats a révélé que les variations de ces caractéristiques n'étaient nullement significatives.

Faut-il en conclure que l'évolution au cours du dessèchement est limitée à la minéralisation de l'azote et du carbone et à la modification du taux de saccharase ou du pH ? Évidemment, non. En effet, certaines variations ont été masquées :

— soit par l'hétérogénéité du sol très difficile à éliminer malgré de nombreuses répétitions et l'emploi de la technique des sacs en tulle de nylon,

— soit par l'imperfection de certaines méthodes et par le fait que, pour ces études au champ, les numérations de microorganismes n'ont pu être faites sur des échantillons frais, alors que, pour l'étude expérimentale au laboratoire, la plupart des analyses ont été exécutées sur les échantillons immédiatement à la sortie de l'étuve d'incubation.

Enfin, les sols étudiés en place — à part le sol d'argile noire de Pout — sont caractérisés par des réserves minérales et organiques peu importantes et une microflore relativement peu abondante, de sorte que les variations sont faibles en valeur absolue et donc difficilement mesurables, car elles sont de l'ordre de grandeur de la précision des techniques analytiques utilisées.

D. — Possibilités d'évolution de la matière organique du sol en saison sèche

On a vu que certains secteurs de l'activité biologique sont encore actifs, parfois très actifs, dans l'intervalle de pF 5,0-4,2. Or, les données concernant l'humidité du sol après l'arrêt des pluies, en Afrique Occidentale notamment, montrent que l'horizon 5-25 cm peut se maintenir pendant deux mois, et souvent beaucoup plus longtemps, dans cet intervalle de pF. Bien que les plantes à enracinement superficiel aient alors cessé de vivre et les végétaux à enracinement plus profond n'absorbent plus les éléments nutritifs en surface, la microflore tellurique peut encore intervenir, en particulier dans les processus de minéralisation de l'azote et du carbone organique.

CHAPITRE XII

ÉVOLUTION DE L'ACTIVITÉ BIOLOGIQUE DU SOL EN SAISON SÈCHE SOUS L'INFLUENCE DES APPORTS SECONDAIRES D'HUMIDITÉ

A. — Aperçu de l'importance des apports secondaires d'humidité au sol.

Par apports secondaires d'humidité, Damagnez désigne « *les apports vers le sol d'eau provenant des phénomènes de condensation et d'adsorption directe de la vapeur d'eau* » (28).

Ces phénomènes commencent à être relativement bien connus en région méditerranéenne où cet auteur estime qu'ils entraînent une augmentation de 2 p. 100 de l'humidité du sol pendant la nuit (28,29).

En Afrique de l'Ouest, s'il n'existe aucune étude sur les apports secondaires d'humidité au sol, on dispose cependant, d'un certain nombre de publications sur la

TABLEAU 49

Quantité d'eau fixée pendant la nuit par les échantillons de sol exposés à la rosée.

Date de la détermination	Eau fixée en g pour 100 g de sol	Diminution correspondante du pF	Estimation de la rosée par la méthode des plaques de plâtre (g/dm^2)
1er février 1961	1,47	0,37	0,265
2 février 1961	1,33	0,33	0,083
4 février 1961	2,39	0,60	0,396
8 février 1961	2,06	0,52	0,469
9 février 1961	2,15	0,52	0,800
10 février 1961	3,50	0,88	1,004
11 février 1961	3,00	0,75	0,667
15 février 1961	2,39	0,60	0,499
16 février 1961	2,80	0,70	0,824
17 février 1961	1,66	0,42	0,277
18 février 1961	1,18	0,30	0,154
22 février 1961	2,75	0,69	0,704
23 février 1961	2,23	0,56	0,380
24 février 1961	2,79	0,70	0,586
1er mars 1961	2,69	0,67	0,692
2 mars 1961	2,17	0,54	0,363
3 mars 1961	1,38	0,35	0,266
4 mars 1961	2,01	0,50	0,367
8 mars 1961	2,10	0,53	0,268
9 mars 1961	1,70	0,43	0,239
10 mars 1961	1,83	0,46	0,334
11 mars 1961	2,14	0,54	0,329

rosée. Celles de MASSON, en particulier, permettent de comparer les quantités de rosée tombée dans la presqu'île du Cap-Vert et dans les autres parties du monde, malgré la diversité des procédés utilisés par les différentes stations d'observation (85). Les maxima relevés à Dakar sont du même ordre de grandeur que ceux que l'on a notés dans les pays méditerranéens. On pouvait donc supposer que le sol à Dakar reçoit effectivement un apport occulte d'eau comparable à celui que DAMAGNEZ a mesuré à Montpellier.

C'est ce que nous avons cherché à vérifier en effectuant l'expérience suivante. On a exposé à l'extérieur, sur une plate-forme en ciment, un lot de plateaux en aluminium de 18 cm de diamètre contenant chacun 200 g d'un sol d'argile noire tropicale et l'on a mesuré les quantités d'eau fixée pendant 22 nuits entre le 1er février et le 11 mars 1961. Le tableau 49 montre que ces quantités d'eau ont varié du simple au double suivant les conditions atmosphériques (1).

Bien que ces mesures n'aient pas été faites dans les mêmes conditions que celles où s'est placé DAMAGNEZ, il est intéressant de noter que les quantités d'eau fixée par le sol sont du même ordre de grandeur à Dakar qu'à Montpellier soit en moyenne 2 p. 100 (tableau 49).

Entre les quantités X d'eau fixée par les échantillons de sol et les quantités Y d'eau fixée par les plaques de plâtre suivant la méthode MASSON (85), il existe une relation de la forme :

$$X = 2{,}02 \log Y - 305$$

(le coefficient de corrélation $r = 0{,}87$, avec $P < 0{,}001$) permettant de prévoir, à partir des résultats donnés par la méthode des plaques de plâtre, les quantités d'eau susceptibles d'être fixée par le sol.

B. — CONSÉQUENCES DES APPORTS SECONDAIRES D'HUMIDITÉ SUR L'ACTIVITÉ BIOLOGIQUE DU SOL

En même temps que le lot de plateaux destinés à la mesure des quantités d'eau fixée, on a exposé trois autres lots de plateaux contenant chacun 200 g du même sol soumis au préalable aux traitements suivants, destinés à mettre en évidence d'éventuels phénomènes d'immobilisation de l'azote par des substances hydrocarbonées :

a) enrichissement en glucose (2. p. 100)et nitrate de potassium (0,3 p. 100) ;

b) enrichissement en cellulose (2 p. 100) et nitrate de potassium (0,3 p. 100) ;

c) aucun enrichissement.

Dans le cas de l'enrichissement, le rapport C/N était donc de l'ordre de 20.

La moitié des plateaux a été abritée par une feuille de contreplaqué pour éliminer l'apport direct de rosée.

Il peut sembler, a priori, anormal d'avoir cherché à étudier les phénomènes d'immobilisation plutôt que ceux de minéralisation de l'azote. En fait, c'est à dessein que nous avons axé notre expérience sur les processus d'immobilisation. Ceux-ci sont en effet toujours essentiellement d'origine biologique dans les conditions expérimentales où nous avons opéré, alors que la minéralisation de l'azote par voie

(1) Ces déterminations ont été effectuées au laboratoire de physique de l'Université de Dakar sous le contrôle de Mlle O. SALVADOR que nous tenons à remercier ici très vivement de l'aide qu'elle a bien voulu nous apporter pour la réalisation de cette expérience.

biologique peut être masquée, partiellement tout au moins, par des phénomènes d'ordre physico-chimique entraînant la libération d'azote minéral (effet DROUINEAU déjà signalé au chapitre III, paragraphe J).

Le tableau 50 montre que, dans les plateaux non abrités, le blocage de l'azote nitrique est de 64,0 p.p.m. dans le cas de l'enrichissement en glucose, ce qui représente 16 p. 100 de l'azote nitrique incorporé. Cette immobilisation est encore relativement élevée dans le cas de la cellulose puisqu'il représente 45,6 p.p.m. soit approximativement 11 p. 100 de l'azote nitrique apporté.

TABLEAU 50

Immobilisation de l'azote minéral dans un sol d'argile noire exposé à l'extérieur avec et sans abri.

Enrichissement	Azote minéral en p.p.m.	Sol conservé au sec au laboratoire	Sol exposé à l'extérieur sans abri	Sol exposé à l'extérieur sous abri	A(P=0,05)
Aucun (témoin)	Ammoniacal.....	4,0	11,3 (+ 7,3)	8,7 (+ 4,7)	2,9
	Nitrique	4,7	5,3 (+ 0,6)	3,7 (— 1,0)	11,5
	Ammoniacal + nitrique ..	8,7	16,6 (+ 7,9)	12,4 (+ 3,7)	11,0
Glucose (2 %) + nitrate de potassium (0,3 %)	Ammoniacal.....	4,3	7,7 (+ 3,4)	9,3 (+ 5,0)	2,9
	Nitrique	422,3	358,3 (— 64,0)	379,7 (— 42,6)	11,5
	Ammoniacal + nitrique ..	426,6	366,0 (— 60,6)	389,0 (— 37,6)	11,0
Cellulose (2 %) + nitrate de potassium (0,3 %)	Ammoniacal.....	5,7	10,0 (+ 4,3)	9,3 (+ 3,6)	2,9
	Nitrique	424,3	378,7 (— 45,6)	398,3 (— 26,0)	11,5
	Ammoniacal + nitrique ..	430,0	388,7 (— 41,3)	407,6 (— 22,4)	11,0

Dans les échantillons de sol abrités, les phénomènes d'immobilisation sont moins intenses, mais encore très significatifs. Ils sont liés, non plus à l'apport d'eau sous forme de rosée, mais vraisemblablement pour la plus grande part, à la fixation d'eau par adsorption directe de la vapeur d'eau atmosphérique.

On notera, en outre, un accroissement significatif de + 7,3 p.p.m. de la teneur en azote ammoniacal du sol exposé à l'extérieur par rapport au sol conservé au laboratoire. Cet accroissement peut être dû en partie à l'activité biologique des germes ammonificateurs, mais il peut être aussi attribué à l'action du rayonnement solaire (effet DROUINEAU).

CONCLUSIONS

Lorsque le sol se dessèche, son activité biologique globale tend à diminuer mais, contrairement à ce que l'on observe pour beaucoup de végétaux supérieurs, le pF 4,2 ne constitue pas un seuil marquant l'arrêt de cette activité. En effet si, au-delà de ce pF, certains groupements de microorganismes cessent de participer aux processus évolutifs de la matière organique du sol, d'autres continuent à intervenir, parfois même avec un dynamisme accru, notamment aux environs du pF 5,0, la limite extrême de toute activité biologique correspondant au pF 5,5 ou même 5,6.

Ces faits nous ont incité à essayer de dégager les règles fondamentales régissant le comportement de la microflore tellurique dans le domaine des faibles humidités, en étudiant systématiquement, par des techniques différentes (biochimiques et microbiologiques), les processus de minéralisation, d'immobilisation et d'évolution de la stabilité structurale se déroulant dans des sols aussi représentatifs que possible de chacun des principaux types pédologiques des zones semi-aride et tropicale sèche de l'Ouest africain.

L'énoncé de ces règles, dont on rappellera ici les quatre plus importantes, est essentiellement basé sur la notion de disponibilité de l'eau dans le sol, exprimée en pF, et sur la notion de seuil qui a permis de préciser, pour chacun des grands groupes de microorganismes, le pF limite au-delà duquel leur activité cesse. En réalité, pour des motifs de caractère purement expérimental, il a été plus facile — et d'ailleurs sans inconvénient, en raison de l'importance réduite des phénomènes d'hystérésis aux très faibles humidités — d'étudier les différents processus dans le sens de l'humectation plutôt que dans celui du dessèchement. On a donc défini ce pF limite comme *le seuil à partir duquel on observe, dans un sol donné, le démarrage significatif de l'activité biologique d'un groupement de microorganismes, au bout d'un laps de temps suffisant pour atteindre le palier correspondant à la stabilisation du phénomène.*

1. — *Règle relative à l'étalement des seuils jusqu'au pF 5,5*

Les exigences minima des micoorganismes telluriques, vis-à-vis du facteur eau, sont telles que les seuils correspondants s'étalent sur une gamme de pF allant depuis des valeurs inférieures à 3,6 jusqu'à 5,5 et même 5,6. On a pu ainsi distinguer les trois catégories suivantes de groupements écologiques, avec naturellement des cas intermédiaires :

a) *Les groupements hyperxérophiles* composés de germes dont le seuil est supérieur à 4,9. Rentrent dans cette catégorie, la plupart des microorganismes responsables :

— de l'ammonification de la tyrosine ;
— de la glucolyse ;
— de la sulhydrisation ;
— de la minéralisation du glycérophosphate ;

— de la dégradation des substances végétales complexes (feuilles d'Arachide, feuilles de Teck, par exemple)

et une partie des microorganismes responsables :

— de l'amylolyse ;

— de l'ammonification de la caséine.

b) *Les groupements xérophiles* composés de germes dont le seuil est compris entre 4,9 et 4,2. Rentrent dans cette catégorie, la plupart des microorganismes responsables :

— de la dégradation de la cellulose ;

— de la sulfoxydation.

et une partie des microorganismes responsables :

— de l'amylolyse ;

— de l'ammonification de la caséine ;

— de la nitrification du sulfate d'ammoniaque.

c) *Les groupements hygrophiles* composés de germes dont le seuil est inférieur à 4,2. Rentrent dans cette catégorie, la plupart des microorganismes responsables :

— de la dégradation de la carboxyméthylcellulose ;

— de la fixation de l'azote atmosphérique (*Azotobacter chroococcum*) ;

et une partie des microorganismes responsables :

— de la nitrification du sulfate d'ammoniaque.

Les microorganismes responsables de la minéralisation du carbone organique préexistant naturellement dans le sol, appartiennent à la fois à la première et à la deuxième catégorie. Les microorganismes responsables de l'ammonification de l'azote organique préexistant naturellement dans le sol, appartiennent à la fois à la deuxième et à la troisième catégorie.

En ce qui concerne les microorganismes responsables des processus *d'immobilisation de l'azote minéral ou de régénération de la stabilité structurale*, on a montré que les seuils correspondants sont, en fait, confondus avec les seuils de dégradation des substances énergétiques utilisées (glucose, amidon, cellulose...).

2. — *Règle relative aux facteurs influant sur le niveau des seuils*

Le niveau des seuils dépend essentiellement de la nature de la substance métabolisable mise à la disposition de la microflore tellurique d'une part, et de la nature du type pédologique considéré d'autre part. C'est ainsi qu'on a mis en évidenec des seuils d'ammonification différents, suivant que l'on avait incorporé au sol de la tyrosine, de la caséine ou une substance végétale de composition complexe. En ce qui concerne l'influence du type pédologique, elle est très nette dans certains cas, par exemple celui de la nitrification du sulfate d'ammoniaque où les seuils s'échelonnent, suivant les sols, entre les pF 4,6 et 3,6 et peuvent descendre encore à des pF inférieurs.

En fait, la nature de la substance métabolisable n'intervient pas directement mais par l'intermédiaire des groupements physiologiques spécialisés correspondants qui comprennent un nombre variable d'espèces dont les moins exigeantes vis-à-vis du facteur eau règlent, en définitive, le niveau des seuils. Lorsque ces espèces microbiennes sont *ubiquistes*, c'est-à-dire largement répandues dans tous les sols, les seuils sont pratiquement indépendants de la nature des types pédologiques. Lorsque les espèces microbiennes sont plus *endémiques*, les seuils correspondant à une fonction bien définie peuvent varier fortement d'un type de sol à l'autre.

3. — *Règle relative à l'influence élective du pF sur l'activité des groupements de microorganismes*

Une des conséquences les plus remarquables de la disparité des seuils énoncée dans la première règle réside dans la prédominance, à certaines humidités, de processus favorisés électivement par rapport à d'autres. Les deux exemples les plus typiques en sont :

a) la prédominance, au voisinage du point de flétrissement, de la cellulolyse sur l'ammonitrification, avec pour corollaire l'immobilisation au moins partielle de l'azote minéral ;

b) la prédominance de l'ammonification sur la nitrification aux pF supérieurs à 4,2.

4. — *Règle relative à la prédominance de la microflore fongique sur la microflore bactérienne aux faibles humidités*

La microflore fongique est beaucoup moins exigeante en eau que la microflore bactérienne, de sorte qu'elle exerce une action prédominante dans l'intervalle de pF 5,6-4,9. C'est en particulier elle qui est responsable des processus conduisant à la régénération de la structure à ces pF élevés. Lorsque le pF descend au-dessous de 4,9-5,0, la microflore fongique est en partie relayée par la microflore bactérienne.

***

L'étude des profils hydriques des sols des régions tropicales sèches et semi-arides a révélé que les horizons supérieurs peuvent se maintenir, pendant plusieurs mois après l'arrêt des pluies, dans l'intervalle de pF 4,2-5,0. Or on a prouvé que certains secteurs de l'activité biologique sont encore actifs, et parfois même très actifs, dans cet intervalle de pF. Il n'est donc pas étonnant d'observer, dans des sols en place, au début de la saison sèche, une évolution très nette se traduisant, en particulier, par une minéralisation active du carbone et de l'azote organiques. On a pu, d'autre part, mettre en évidence le développement de processus de nature biologique, uniquement sous l'influence d'apports secondaires d'humidité dans le sol, c'est-à-dire d'apports provenant de phénomènes de condensation ou d'adsorption directe de la vapeur d'eau. En ce qui concerne plus particulièrement le cycle de l'azote, l'évolution en saison sèche se fait, en général, dans le sens de la minéralisation ; mais elle peut également correspondre — tout au moins momentanément — à une immobilisation si la composition de la matière organique, et en particulier son rapport C/N, sont favorables à ce dernier processus.

On a vérifié, en outre, que certains processus — tels que l'augmentation de la teneur du sol en azote ammoniacal échangeable — pouvaient être de nature physico-chimique. Il y aurait donc possibilité de superposition des processus biologiques et physico-chimiques, ces derniers restant seuls en cause lorsque le pF dépasse 5 ,6.

***

En dehors des applications possibles dans le domaine des recherches sur les populations microbiennes mixtes — résultant, par exemple, de l'utilisation de l'influence élective du pF pour provoquer un déphasage artificiel des processus biologiques

qui, dans des conditions hydriques normales, sont simultanés — on peut prévoir que les règles énoncées ici permettront ultérieurement de donner une explication rationnelle à un certain nombre de phénomènes d'ordre agronomique ou pédologique, notamment en ce qui concerne l'évolution de la matière organique dans les sols de la zone tropicale sèche et de la zone semi-aride. Bien que nos recherches n'aient porté que sur des types pédologiques d'une partie de l'Ouest africain, il est permis de penser que la plupart des résultats exprimés ici sont extrapolables aux régions présentant une saison sèche bien caractérisée et, en particulier, aux zones arides proprement dites, ainsi qu'aux régions méditerranéennes.

SUMMARY

A CONTRIBUTION TO THE MICROBIAL DYNAMICS IN SOILS OF SEMI-ARID AND DRY TROPICAL REGIONS

When a soil is drying, its overall biological activity tends to decrease but, contrary to higher plants, pF 4.2 is not the threshold value leading to the stoppage of microbial activity.

A systematic study of the response of the soil microflora to low moisture levels produced the following results :

1° The minimum moisture requirements of soil micro-organisms are such that threshold values extend over a range from pF 3.6 to 5.5-5.6. The following ecological groups, with intermediate cases, had been distinguished :

a) *hyperxerophilous groups*, composed of micro-organisms with threshold values greater than 4.9 (ex : most of the micro-organisms inducing ammonification of tyrosine, glycolysis, sulphydrization, and some of the organisms responsible for amylolysis and ammonification of casein) ;

b) *xerophilous groups*, composed of micro-organisms with threshold values between 4.9 and 4,2 (ex. most of the micro-organisms participating in cellulose decomposition and sulphur oxidation, and some of the organisms responsible for amylolysis, ammonification of casein and nitrification of ammonium sulphate) ;

c) *hydrophilous groups*, composed of micro-organisms with threshold values lower than 4.2 (ex : *Azotobacter chroococcum* and some of the organisms nitrifying ammonium sulphate).

2° Threshold values of the *immobilization of mineral nitrogen* or *regeneration of structural stability* are confounded with threshold values of the degradation of energy substances utilized by micro-organisms participating in this process.

3° The magnitude of threshold values depends both on the nature of substances available for the metabolism of the soil microflora and on the nature of the soil type considered.

4° At certain moisture levels, there are electively preferred processes in comparison with others (ex : the predominance of ammonification over nitrification at pF values greater than 4.2).

5° The fungus flora has much lower moisture requirements than the bacterial flora, so that it preponderates in activity within the limits of pF 5.6-4.9.

6° The moisture profiles of soils in dry tropical and semi-arid regions showed that the tops horizons may maintain values of pF 4.2-5.0 for several months after the rainfall stopped, providing conditions for an active mineralization of soil carbon at the start of the dry season.

7° Certain biological processes can only proceed under the effect of secondary accretions of soil moisture, such as moisture deriving from phenomena of condensation or absorption of water vapours.

ZUSAMMENFASSUNG

BEITRAG ZUR DYNAMIK DER BODENMIKROBIOLOGIE IN HALBTROCKENER UND TROCKENER TROPENZONE

Sobald der Boden austrocknet, nimmt die biologische Tätigkeit ab, aber im Gegensatz zu dem, was man für viele höhere Pflanzen feststellt, ist das pF 4,2 nicht die Schwelle, die einen Stillstand dieser Tätigkeit anzeigt.

Das systematische Studium des Verhaltens der Bodenmikroflora gegenüber schwacher Feuchtigkeit ergibt folgende Regeln :

1° Die Minimalbedürfnisse der Bodenmikroorganismen gegenüber dem Faktor Wasser entsprechen einer pF-Skala, die von Werten unter 3,6 bis zu 5,5 und selbst 5,6 reichen. Folgende drei Kategorien ökologischer Gruppen mit Zwischenstufen wurden festgegelt :

a) die *hyperxerophilen Gruppen*, die aus Mikroorganismen bestehen, deren Grenze 4,9 übersteigt. (z. B. die meisten Mikroorganismen, die für die Ammonifikation der Tyrosin, Glukolyse und Sulfhydrierung verantwortlich sind, und ein Teil der Mikroorganismen die die Amylolyse und die Ammonifikation der Kasein bewirken),

b) die *xerophilen Gruppen*, bestehend aus Mikroorganismen, deren Grenze zwischen 4,1 und 4,2 liegt. (z. B. die meisten Mikroorganismen, die die Degradierung der Zellulose, sowie die Sulfoxydation, bewirken, und eines Teils der Mikroorganismen, die die Amylolyse, die Ammonifikation der Kasein und die Nitrifikation des schwefelsauren Ammoniaks bewirken),

c) die *hygrophylen Gruppen*, aus Mikroorganismen bestehend, deren Grenze unter 4,2 liegt (z. B. *Azotobacter chrococum* und ein Teil der Mikroorganismen, die die Nitrifikation des schwefelsauren Ammoniaks bewerkstelligen),

2° Die Schwellen der *Immobilisierung des mineralischen Stickstoffs* oder der *Regenerierung der Strukturstabilität* werden mit den Grenzen der Degradierung energetischer Substanz die von den betr. Mikroorganismen benützt wird, verwechselt.

3° Die Schwellengrenze wird von der Art der metabolisierbaren Substanz, die zur Verfügung der Bodenmikroflora steht, und der Art des betr. pedologischen Typs bestmmt.

4° Für manche Feuchtigkeitsgrade gibt es Prozesse, die wahlweise andern vorgezogen werden (z. B. die Ammonifikation gegenüber der Nitrifikation für pF $< 4{,}2$).

5° Die Pilzmikroflora hat weniger Ansprüche an die Feuchtigkeit als die Bakterien, sodass erstere im Zwischenraum pF 5,6 bis 4,9 vorherrscht.

6° Die Untersuchung der Wasserprofile der trockenen und halbtrockenen tropischen Gebiete zeigte, dass die oberen Horizonte viele Monate nach Aufhören der Regenperiode zwischen pF 4,2 — 5,0 verbleiben können, was eine aktive Mineralisation des organischen Kohlen- und Stickstoffs bei Beginn der Trockenperiode ermöglicht.

7° Verschiedene Prozesse bilogischer Art können sich ausschliesslich nur unter zusätzlicher Bodenfeuchtigkeit entwickeln, d. h. durch Kondensierung oder Aufnahme von Wasserdampf.

К вопросу микробиальной динамики почв полу-пустынной и сухой тропической зон.

И. ДОММЕРГ (Педологический Центр Ханн-Дакар).

При высыхании почвы ее общая биологическая активонсть имеет тенденцию сокращаться, но, в противоположность тому что происходит у большинства высших растений, pF 4,2 не является границей полной остановки этой активности.

Систематическое наблюдение над реакциями теллурической микрофлоры вызванными ослаблением влажности привело к следующим выводам :

1. Минимальные потребности теллурических микроорганизмов в отношении влаги таковы, что соответственная шкала представляет веер идущий от минимального pF 3,6 до максимального 5,5 и даже иногда 5,6. Микроорганизмы были разделены на три экологические группы, включающие конечно и некоторые промежуточные случаи :

а. Гипперксерофильные группировки — состоят из микроорганизмов минимальная граница которых начинается от pF 4,9 (напр. большинство микроорганизмов вызывающих аммонификацию тирозина, глюколиз, сернистое окисление, а также часть микроорганизмов участвующих в формировании крахмала и аммонификации казеина).

б. Ксерофильные группировки в которые входят микроорганизмы границы которых находятся между максимальным pF 4,9 и минимальным 4,2 (напр. большинство микроорганизмов вызывающих распадение клетчатки и серное окисление, а также часть микроорганизмов принимающих участие в формировании крахмала, аммонификации казеина и нитрификации сернокислого аммония).

в. Гигрофильные группировки заключают микроорганизмы с максимальной границей pF 4,2 (напр. *Azotobacter chroococcum* и часть микроорганизмов вызывающих нитрификацию сернокислого аммония).

2. Пороги *уменьшения растворимости минерального азота* или *возстановления прочности структуры* принимаются обычно за пороги распадения энергетических материй служащих пищей микроорганизмам, которые являются причиной этого процесса.

3. Уровень порогов зависит в одно и то же время от природы вещества предназначающегося для метаболизма и предоставленного теллурической микрофлоре и природы данного педологического типа.

4. При определенных влажностях существует отбор, когда микроорганизмы выбирают некоторые процессы предпочтительно другим.

5. Грибная микрофлора требует меньшей влажности чем микрофлора бактерийная и ее активность преобладает при pF от 5,6 до 4,9.

6. Исследование водных профилей почь сухих тропических и полупустынных районов показало что pF верхних горизонтов продолжает находиться в течении нескольких месяцев после конца дождей в интервалле между 4,2 и 5,0, что и разрешает активную минерализацию углерода и органического азота в почвах в начале сухого сезона.

7. Определенные процессы биологического характера развиваются только благодаря излишку влаги принесенной в почву в результате явлений конденсации и всасывания почвой водных паров.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

(1) Allison F. E., Carter J. N., Sterling L. D., 1960. The effect of partial pressure of oxygen on denitrification. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **24**, 283-285.

(2) Aubert G., Duchaufour Ph., 1956. Projet de classification des sols. *C. R. 6e Congr. intern. Sci. Sol, Paris.*, **5**, 97, 597-604.

(3) Aubert G., 1958. Classification des sols. *Analyse des livres, brochures et articles à l'intention des pédologues de l'ORSTOM*, **8**, 2, 1-3.

(4) Aubreville A., 1949. Climats, forêts et désertification de l'Afrique tropicale. *Soc. d'éditions géographiques, maritimes et coloniales, Paris.*

(5) Aubreville A., 1950. Flore forestière soudano-guinéenne. *Soc. d'éditions géographiques, maritimes et coloniales, Paris.*

(6) Ayers A. D., Campbell R. B., 1951. Freezing point of water in soil as related to salt and moisture content of the soil. *Soil. Sci.*, **72**, 201.

(7) Barjac H. de, Pochon J., 1955. Appréciation de la microflore tellurique anaérobie active sur le soufre organique. *Ann. Inst. Pasteur*, **89**, 591-593.

(8) Barrow N. J., 1960. The effects of varying the nitrogen, sulphur, and phosphorus content of organic matter on its decomposition. *Austr. J. agric. Res.*, **2**, 317-330.

(9) Bavers L. D., 1956. Soil physics. *John Wiley, New York.*

(10) Beaucorps G. de, 1955-1956. Contrôle électrique de l'humidité des sols. Premier aperçu sur les rapports entre l'eau et la forêt. *Soc. Sci. Nat. Phys. Maroc.*, **10, 11,**, 41-57.

(11) Beaucorps G. de, Marion J., Sauvage Ch., 1956. Essai monographique sur une parcelle d'expériences dans la forêt de chêne-liège de la Mamora (Maroc). *Station de Recherches Forestières de Rabat*, Rabat.

(12) Bernier B., 1960. Observations sur le métabolisme respiratoire de quelques humus forestiers. *Université Laval. Québec.*

(13) Betremieux R., 1948. Dosage de l'ammoniaque et des nitrates. *Traité pratique de chimie végétale de Brunel, Georges frères, Tourcoing*, II, 344-345.

(14) Birch H. F., 1958. The effect of soil drying on humus decomposition and nitrogen availability. *Plant and Soil*, **10**, 1-31.

(15) BIRCH H. F., 1959. Further observations on humus decomposition and nitrification. *Plant and Soil*, **11**, 262.

(16) BŒUF F., 1932. Contribution à l'étude du blé dans le milieu nord-africain (thèse). *Société anonyme de l'imprimerie rapide*, Tunis.

(17) BONFILS P., FAURE J., 1956. Les sols de la région de Thiès. *Ann. Centre Rech. Agron. Bambey, Sénégal.*, **16**, 5-92.

(18) BRUNEL A., 1949. Traité pratique de chimie végétale. *Georges frères, Tourcoing.*

(19) BURCIK E., 1950. Ueber die Beziehungen zwischen Hydratur und Wachstum bei Bakterien und Hefen. *Arch. Mikrobiol*, **15**, 203-235.

(20) CAMPBELL R. B., 1952. Freezing point of water in puddled and unpuddled soils at different soil moisture tension values. *Soil Sci.*, **73**, 221-229.

(21) CARLES J., SOUBIES L., GADET R., 1958. Les acides aminés du sol et leurs variations *C. R. Acad. Sci.*, **247**, 1229-1232.

(22) CARLES J., DECAU J., 1960. De quelques conditions susceptibles de modifier les proportions des acides aminés du sol. *Ann. agron.*, **11**, 557-575.

(23) CHAMPION J., DUGAIN F., MAIGNIEN R., DOMMERGUES Y., 1958. Les sols de bananeraies et leur amélioration en Guinée. *Fruits*, **13**, 415-462.

(24) CHARREAU C., DOMMERGUES Y., 1959. Études des pâturages tropicaux de la zone soudanienne. *Vigot frères, Paris.*

(25) CHARREAU C., 1961. Dynamique de l'eau dans deux sols du Sénégal. *C. R. A. Bambey, Sénégal.*

(26) CHARREAU C., VIDAL P., 1961. Influence du *Faidherbia albida* sur la fertilité du sol et la nutrition minérale du mil. *C. R. A. Bambey, Sénégal.*

(27) COPPIER O., BARJAC H. de, 1952. De la richesse d'un sol en microorganismes nitrificateurs. *Ann. Inst. Pasteur*, **83**, 118-125.

(28) DAMAGNEZ J., 1957. Les sources secondaires d'humidité et l'approvisionnement en eau des sols de la France méditerranéenne. *C. R. Ass. gén. Toronto, Asso. intern. Hydrol. sci.*, **2**, 446-457.

(29) DAMAGNEZ J., 1958. Les propriétés hygroscopiques des sols et les apports secondaires d'humidité. *Ann. agron.*, **9**, 659-676.

(30) DEMOLON A.. 1948. Dynamique du sol. *Dunod*, Paris.

(31) DESVEAUX R., 1958. Les divers modes d'expression des résultats des analyses chimiques d'engrais et de végétaux. *Fertilité*, **4**, 19-24.

(32) DOBEREINER J., ALVAHYDO R., 1960. Influencia da umidade do solo na população das bacterias do genero *Beijerinkia Derx.* (Non publié).

(33) DOMMERGUES Y., 1956. Numération des germes telluriques sur milieux électifs au silico-gel. *C. R. 6e Congr. intern. Sci. Sol. Paris*, **3**, 66, 393-397.

(34) DOMMERGUES Y., 1959. L'activité de la microflore tellurique aux faibles humidités. *C. R. Acad. Sci.*, **248**, 487-490.

(35) DOMMERGUES Y., 1960. La notion de coefficient de minéralisation du carbone dans les sols. *Agron. trop.*, **15**, 54-60.

(36) DOMMERGUES Y., 1960. Un exemple d'utilisation des techniques biologiques dans la caractérisation des types pédologiques. *Agron. trop.*, **15**, 61-72.

(37) DOMMERGUES Y., 1960. Influence du rayonnement infrarouge et du rayonnement solaire sur la teneur en azote minéral et sur quelques caractéristiques biologiques des sols. *Agron. trop.*, **15**, 381-389.

(38) DOMMERGUES Y., 1960. Application de la méthode de numération cinétique à la caractérisation de quelques groupements physiologiques de microorganismes telluriques. *Ann. Inst. Pasteur.*, **98**, 887-901.

(39) DOMMERGUES Y., 1960. Minéralisation de l'azote aux faibles humidités. *C. R. 7e Congr. intern. Sci. Sol. Madison*, **2**, 672-678.

(40) DROUINEAU G., LEFEVRE G., 1951. Influence du climat méditerranéen sur la teneur en azote minéral dans les sols calcaires. *C. R. Acad. Agric. Fr.*, 7 mars 1951.

(41) DROUINEAU G., LEFEVRE G., BLANC-AICARD D., 1953. Observations sur la localisation de l'azote minéral en été sous le climat méditerranéen. *Ann. agron.*, **4**, 245-256.

(42) DROUINEAU G., LEFEVRE G., BLANC-AICARD D., 1953. Minéralisation de l'azote organique au cours de la saison sèche sous climat méditerranéen. *C. R. Acad. Sci.*, **236**, 424-426.

(43) DUCHAUFOUR Ph., 1959. Note sur l'évolution de la matière organique dans les sols. *C. R. Acad. Agric. Fr.*, 27 mai 1959.

(44) DUCHAUFOUR Ph., 1960. Précis de Pédologie. *Masson, Paris.*

(45) DUCHAUFOUR Ph., 1961. Le rôle de la végétation dans l'évolution des sols. *Bull. Ass. franc. Et. Sol.*, 168-193

(46) DUNNETT C. W., 1955. A multiple comparison procedure for comparing several treatments with a control. *J. Amer. Stat. Assoc.*, **50**, 1096-1122.

(47) FLEURY P., LECLERC M., 1943. La méthode nitro-vanado-molybdique de Misson pour le dosage colorimétrique du phosphore. *Bull. Soc. Biol. Fr.*, **25**, 201-205.

(48) FREDERICK L. R., STARKEY R. L., SEGAL W., 1957. Decomposability of some organic sulfur compounds in soil. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 287-292.

(49) GEOGHEGAN M. J., 1950. Aggregate formation in the soil. *Trans. 4 th Int. Congr. Soil. Sci.*, **1**, 198-201.

(50) GREAVES J. E., CARTER E. G., 1920. Influence of moisture on the bacterial activities of the soil. *Soil Sci.*, **10**, 361-387.

(51) HALLAIRE M., 1953. Diffusion capillaire de l'eau dans le sol et répartition de l'humidité en profondeur sous sols nus et cultivés. *Ann. agron.*, **4**, 143-290.

(52) HALLAIRE M., 1960. Le problème du potentiel de l'eau dans le sol et de la disponibilité de l'eau pour la végétation. *Ann. Physiol. vég.*, **2**, 119-130.

(53) HARMSEN G. W., VAN SCHREVEN D. A., 1955. Mineralization of organic nitrogen in soil. *Adv. Agron.*, **7**, 299-398.

(54) HART M. G. R., 1959. Sulphur oxidation in tidal mangrove soils of Sierra Leone. *Plant and Soil*, **11**, 215-236.

(55) HENIN S., 1938. Étude physico-chimique de la stabilité structurale des terres. *Imprimerie nationale*, Paris

(56) HENIN S., 1944. Influence des phénomènes microbiens sur la formation d'une structure stable. *C. R. Acad. Agric. Fr.*, 373-375.

(57) HENIN S., MONNIER G., COMBEAU A., 1958. Méthode pour l'étude de la stabilité structurale des sols. *Ann. agron.*, **4**, 71-90.

(58) HENIN S., 1959. Cours de physique du sol. (Non publié).

(59) HENIN S., FEODOROFF A., GRAS R., MONNIER G., 1960. Le profil cultural. Principes de physique du sol. *Société d'Éditions des Ingénieurs agricoles, Paris.*

(60) HOFMANN E., SEEGERER A., 1951. Ueber das Enzymsystem unserer Kultur-böden (Saccharase). *Biochem. Z.*, **322**, 174-179.

(61) HOFMANN E., HOFMANN G., 1955. Ueber herkumpt, Bestimmung und Bedeutung der Enzymes im Boden. *Z. Pfl. Ernähr. Düng.*, 70-79.

(62) IARKOV S. P., 1956. Dynamique saisonnière de certains processus dans les sols. *C. R.* 6me *Congr. intern. Sci. Sol., Paris.*, **5**, 66, E, 401-405.

(63) IRITANI W. M., ARNOLD C. Y., 1959. Nitrogen release of vegetable crop residues during incubation as related to their chemical composition. *Soil. Sci.*, **89**, 74-82.

(64) JOHNSON L. F., CURL E. A., BOND J. H., FRIBOURG H. A., 1960. Methods of studying soil microflora-plant disease relationships. *Burgess publishing company, Minneapolis.*

(65) JONES T. A., 1958. Carbon studies on the irrigated soils of Sudan Geriza. *J. Soil Sci.*, **9**, 272-276.

(66) JORDAN H. V., ENSMINGER L. E., 1958. The role of sulfur in soil fertility. *Adv. Agron.*, **10**, 408-434.

(67) KATZNELSON H., STEVENSON I. L., 1956. Observations on the metabolic activity on the soil microflora. *Canad. J. Microbiol.*, **2**, 611-622.

(68) KILLIAN C., FEHER D., 1949. Microbiologie des sols désertiques. *Paul Lechevalier, Paris.*

(69) KRAMER P. J., 1949. Plant and soil water relationships. *Mc. Graw-Hill book Co*, New York.

(70) LEMEE G., 1959. Le bilan d'eau des plantes vasculaires dans ses rapports avec l'humidité du sol. *Bull. Soc. Fr. Physiol. vég.*, **3**, 118-132.

(71) LEMEE G., 1955. Exposé général sur les rapports entre sols et végétation. *Écologie Végétale. Actes du Colloque de Montpellier.* UNESCO, Paris.

(72) LEMEE G., LOSSAINT P., METTAUER H., WEISSBECKER R., 1958. Recherches préliminaires sur les caractères biochimiques de l'humus dans quelques groupements forestiers de la Plaine d'Alsace. *Angew. Pfl. Soziol.*, **15**, 93-101.

(73) LOSSAINT P., 1960. Étude expérimentale de la mobilisation du fer des sols sous l'influence des litières forestières. *Ann. agron.*, **11**, 369-414, 493-542.

(74) LUNT H. A., SWANSON C. L. W., JACOBSON H. G. M., 1950. Méthode des tests rapides de Morgan pour l'analyse du sol. Connecticut Agric. Exp. Stat., Bull 541 (Trad. in *Agron. trop.*, 1951, **6**, 515-528).

(75) LUTZ H. J., CHANDLER R. F., 1951. Forest soils. *John Wiley and sons, New York.*

(76) MC CALLA T. M., 1942. Influence of biological products on soil structure and infiltration. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **7**, 209-214.

(77) MAHEUT J., DOMMERGUES Y., 1960. Les teckeraies de Casamance. *Bois For. Trop.*, **70**, 25-42.

(78) MAIGNIEN R., 1956. Classification des sols subarides au Sénégal. *C. R. 6e Congr. intern. Sci. Sol., Paris*, **77**, V, 469-472.

(79) MAIGNIEN R., 1959. Les sols subarides au Sénégal. *Agron. trop.*, **15**, 535-571.

(80) MAIGNIEN R., 1959. Les sols de la presqu'île du Cap-Vert. *Centre de Pédologie de Hann, Dakar.*

(81) MANIL P., CULOT J. P., BROUWERS L., 1956. Contribution à l'analyse du sol par voie microbiologique. *Bull. Inst. Agron. Gembl.*, **24**, 142-207.

(82) MARSHALL T. J., 1959. Relations between water and soil. *Commonwealth agricultural bureaux, Bucks, England.*

(83) MARTIN J. P., WAKSMAN S. A., 1940. Influence of microorganisms in soil aggregation and erosion. *Soil Sci.*, **50**, 29-47.

(84) MASSIBOT J. A., 1946. La technique des essais culturaux et des études d'écologie agricole. *Georges frères*, Tourcoing.

(85) MASSON H., 1954. La rosée et les possibilités de son utilisation. *Ann. Éc. Sup. Sci. Dakar.*, **1**, 3-44.

(86) MAYMARD J., COMBEAU A., 1960. Effet résiduel de la submersion sur la structure du sol. *Sols africains*, **5**, 123-148.

(87) METRO A. E., BEAUCORPS G. de., 1958. Influence des peuplements d'Eucalyptus sur l'évolution des sols sablonneux du Rharb. *Fertilité*, **4**, 3-11.

(88) MEYER J. A., 1959. Fluctuations de l'azote minéral dans les sols sous cultures vivrières. *C. R. 3e Conf. interafric. Sols*, Dalaba **1**, 517-524.

(89) MICHOUSTINE E. N., 1956. La science des associations microbiennes du sol et son développement. *C. R. 6e Congr. intern Sci. Sol, Paris.*, **3**, 24, 145-150.

(90) MONOD J., 1958. Recherches sur la croissance des cultures bactériennes. *Hermann*, Paris.

(91) MORTLAND M. M., 1958. Reactions of ammonia in soils. *Adv. Agron.*, **10**, 325-348.

(92) MOSER U. S., OLSON R. V., 1953. Sulfur oxidation in four soils as influenced by soil moisture tension and sulfur bacteria. *Soil Sci.*, **76**, 251-257.

(93) NECKERS J. W., WALKER Ch. R., 1952. Field test for active sulfides in soil. *Soil Sci.*, **74**, 467-470.

(94) NORMAN A. G., 1955. The place of microbiology in soil science. *Adv. Agron.*, **7**, 399-410.

(95) NOVOGRUDSKY D. M., 1947. Microbiological processes in semi-desert soils. III. Category of soil moisture and nitrification. (Analyse dans *Soil and Fertil.*, **10**, 291)

(96) OLSON G.W., MC CALLA T. M., 1960. A comparison of microbial respiration in soils after a twenty year period of subtilling and plowing. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **24**, 349-352.

(97) POCHON J., TCHAN Y. T., 1948. Précis de microbiologie du sol. *Masson, Paris.*

(98) POCHON J., BARJAC H. de, LAJUDIE J., 1957. Recherches sur la microflore des sols sahariens. *Ann. Inst. Pasteur*, **92**, 833-835.

(99) POCHON J., BARJAC H. de, 1958. Traité de microbiologie des sols. *Dunod*, Paris.

(100) ROBINSON J. B. D., 1957. The critical relationship between soil moisture content in the region of wilting point and the mineralization of natural nitrogen. *J. Agric. Sci.*, **49**, 100-105.

(101) RONDELET J., 1959. Étude critique des méthodes de détermination des forces de rétention de l'eau du sol. (Non publié).

(102) RUSSEL J. C., JONES E. G., BAHRT G. M., 1925. The temperature and moisture factors in nitrate production. *Soil. Sci.*, **19**, 381-398.

(103) RUSSELL E. J., 1950. Soil conditions and plant growth. *Longmans. Green and Co, London.*

(104) RYBALKINA A. V., KONONENKO E. V., 1957. Méthode d'étude de la microflore active des sols. *Pédologie*, **7**, 190-196.

(105) SAMTSEVITCH S. A., 1955. Les conditions anaérobies et aérobies de la formation de la structure des sols. *Pochvovedenie*, **5**, 54-59. (Traduction B. I. S. Paris).

(106) SEMENIUK G., 1954. Storage of cereal grains and their products. American association of cereal chemists, St. Paul, Minnesota. *Jones Press Inc., Minneapolis.*

(107) SERVICE PÉDOLOGIQUE INTERAFRICAIN, 1952. Répertoire des modes opératoires d'analyse du sol *B. I. S.*, Paris.

(108) SHAW W. M., ROBINSON B., 1960. Organic matter decomposition and plant nutrient release from incorporation of soybean hay and wheat straw in Holston sandy loam in outdoors lisymeters. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **24**, 54.

(109) SIMON G., 1956. L'enfouissement des pailles. *Bull. Ass. franc. Ét Sol.*, **76**, 486-501.

(110) SIMON G., 1960. L'enfouissement des pailles dans le sol. *Ann. Agron.*, **11**, 5-53, 177-219.

(111) SIMPSON J. R., 1960. The mecanism of surface nitrate accumulation on bare fallow soil in Uganda *J. Soil Sci.*, **11**, 45-60.

(112) STARKEY R. L., 1925. Concerning the physiology of *Thiobacillus thiooxidans*, an autotrophic bacterium oxidizing sulfur under acid conditions. *J. Bact.*, **10**, 135-163.

(113) STARKEY R. L., 1950. Relations of microorganisms to transformations of sulfur in soils. *Soil Sci.* **70**, 55-65.

(114) THOMAS P., 1946. Manuel de Biochimie. *Masson, Paris.*

(115) TRUOG E., 1930. The determination of readily available phosphorus of soils. *J. Amer. Soc. Agron.* **22**, 874-882.

(116) UNITED STATES SALINITY LABORATORY STAFF, 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. *Agriculture Handbok n° 60*, U. S. Dept Agric.

(117) VESSEREAU A., 1960. Méthodes statistiques en biologie et en agronomie. *Baillière et fils*, Paris

(118) VIDAL P., Croissance et nutrition minérale des mils (Pennisetum) cultivés au Sénégal. (A paraître).

(119) WAKSMAN S. A., GERRETSEN F. C., 1931. Influence of temperature and moisture upon the nature and extent of decomposition of plant residues by microorganisms. *Ecology*, **12**, 33-60.

(120) WAKSMAN S. A., 1952. Soil microbiology. *John Wiley and sons. Inc. New York.*

(121) WETSELAAR R., 1960. Capillary movement of nitrate towards tropical soil surfaces. *Nature*, **186**, 572-573.

(122) WIJLER J., DELWICHE C. C., 1954. Investigations on the denitrifying process in soil. *Plant and Soil*, **5**, 155-169.

(123) WINOGRADSKY S., 1949. Microbiologie du sol. Problèmes et méthodes. *Masson, Paris.*

(124) WINSOR G. W., 1958. Mineralisation and immobilisation of nitrogen in soil. *J. Sci. Food Agric.*, **12**, 792-801.

(125) WOLF L., 1898. Ueber den Einfluss des Wassergehaltes der Nährböden auf das Wachstum der Bacterien. *Arch. Hyd. u. Bakteriol.*, **34**, 200-209.

(126) YOUNG J. L., MORTENSEN J. L., 1958. Soil nitrogen complexes. Chromatography of amino-compounds in soil hydrolysates. *Ohio agric. Expt. Sta. Fes. Cir.*, **61**, 18. (Analyse dans *Soils and Fert.*, **22**, 168).

(127) YOUNG L., MAW G. A., 1958. The metabolism of sulphur compounds. *John Wiley, New York.*

ANNEXE

MÉTHODES ANALYTIQUES UTILISÉES

1. — Méthodes d'analyse physique.

a) *Etablissement des courbes de pF :*

— méthode hygroscopique ;

— presse à membrane de Richards ;

— méthode cryoscopique ;

— centrifugation ;

— détermination du point de flétrissement par la méthode biologique (jeunes plants de Tournesol).

b) *Granulométrie :* méthode de la pipette de Robinson, dispersion au pyrophosphate de sodium.

c) *Stabilité structurale :* indice d'instabilité S (Henin et coll.).

d) *Taux d'humidité :* dessèchement à l'étuve à 105°C.

2. — Méthodes d'analyse chimique.

a) *Carbone total :* méthode Walkley. Oxydation sulfo-chromique à froid.

b) *Azote total :* méthode Kjeldahl. Entraînement à la vapeur, réception du distillat dans l'acide borique à 6 p. 100 et titrage par l'acide sulfurique 0,1 N.

c) *Azote ammoniacal :* extraction au chlorure de potassium à 10 p. 100. Entraînement à la vapeur en présence de magnésie.

d) *Azote nitrique + Azote ammoniacal :* extraction au chlorure de potassium à 10 p. 100, entraînement à la vapeur en présence de magnésie et d'alliage Dewarda.

e) *Phosphore assimilable :* méthode Truog. Extraction à l'acide sulfurique 0,002 N. Dosage par la méthode colorimétrique au vanado-molybdate de Fleury et Leclerc.

f) *Sulfates :* test semi-quantitatif au chlorure de baryum de Morgan.

g) *Sulfures :* test semi-quantitatif à l'acétate de plomb de Neckers et Walker.

h) *Glucose :*

— dosage quantitatif : méthode Issekutz-Both.

— test qualitatif : réaction à la liqueur de Fehling.

i) *Amidon :* test qualitatif à l'iode.

j) *Tyrosine :* test qualitatif de Millon.

k) *Conductivité électrique :* mesure effectuée à l'auditohmètre Chauvin-Arnoux, sur filtrat d'une suspension au 1/2,5 après décantation longue.

l) *pH* mesuré au pHmètre Radiometer sur pâte de sol avec électrode de verre G 232 C.

3. — Méthodes d'analyse biologique.

a) *Incubation :* à 30 ± 1°C.

b) *Métabolisme respiratoire :* dégagement potentiel de CO_2 : méthode Blachère modifiée.

c) *Numérations sur milieux liquides.*

Pour chaque échantillon, on a effectué une série de dilution de 10 en 10, en changeant de pipette à chaque dilution. Chaque dilution a été ensemencée sur 2 fois 5 tubes. Les lectures ont été interprétées avec la table de Mc Crady.

d) *Numérations sur milieux gélosés en boîtes de Pétri.*

Les dilutions ont été effectuées suivant la même technique que celle utilisée pour les milieux liquides. L'ensemencement a été fait en ajoutant 1 ml de dilution au milieu gélosé fondu.

e) *Numérations sur silico-gel :* ensemencement par saupoudrage.

f) *Milieux :*

— microflore bactérienne totale (Bactéries et Actinomycètes) : *sodium albumenate agar* de Waksman.
— microflore fongique totale : milieu Martin.
— silico-gel pour *Azotobacter :* Winogradsky.
— silico-gel pour cellulolytiques : Winogradsky.
— silico-gel pour germes nitreux : Winogradsky.
— milieu liquide pour germes nitreux : Coppier et de Barjac.
— milieu liquide pour germes sulfoxydants : milieu Starkey modifié.
— milieu pour germes sulfhydrisants : milieu original.
— milieu pour germes carboxyméthylcellulolytiques : milieu original.

g) *Détermination du seuil de cellulolyse par la méthode du papier-filtre :* méthode originale.

h) *Saccharase :* méthode Hofmann.

i) *Étude des variations saisonnières au champ :* technique originale des sacs en tulle de nylon.

4. — Nombre de répétitions.

a) *Analyses de laboratoire :* en général 4 répétitions. Ce nombre a été porté à 6 et 8, dans le cas de l'étude de la structure, et à 10 et plus, dans le cas de la détermination des seuils de disparition.

b) *Prélèvements au champ :* en général 10 répétitions.

Ann. Agron., 1962, **13** (5), 469-482.

546. 18 : 545. 81

DOSAGE CÉRULÉOMOLYBDIQUE DE L'ACIDE PHOSPHORIQUE DANS LES SOLS, LES VÉGÉTAUX ET LES ENGRAIS

L. DUVAL
Station d'Agronomie, Quimper (Finistère)

SOMMAIRE

Cette note analytique constitue l'application en agronomie d'une étude sur la méthode céruléomolybdique. Elle comporte l'exposé de modes opératoires destinés au dosage de l'acide phosphorique dans différents extraits de sols, de végétaux et d'engrais.

I — INTRODUCTION

Au cours d'une étude fondamentale de la méthode céruléomolybdique, nous avons pu définir, d'une façon générale, les conditions de validité du dosage de l'acide orthophosphorique. En particulier, nous avons précisé l'influence de l'acidité et de la concentration molybdique ainsi que les conditions de formation du réactif sulfomolybdique :

Les conclusions de cette étude nous permettent :

— de définir, dans chaque milieu, les limites entre lesquelles le dosage de l'acide orthophosphorique est indépendant des variations d'acidité ou d'alcalinité de la solution finale,

— de déterminer la composition optimale d'un réactif sulfomolybdique en fonction de la nature de la solution d'extraction,

— d'utiliser les mêmes réactifs pour le dosage de l'acide phosphorique dans des milieux très divers et cela en faisant uniquement varier la proportion du réactif sulfomolybdique dans le volume final,

— d'adopter l'acide ascorbique comme réducteur car son absence d'action sur le composé réduit de l'acide phosphomolybdique permet d'obtenir des colorations très stables et des résultats reproductibles. En outre, l'acide ascorbique confère une étendue maximale à l'aire de stabilité caractéristique de l'acide phosphomolybdique

et ainsi, il améliore le dosage en augmentant les possibilités de variation de l'acidité ou de l'alcalinité du milieu final,

— de proposer un mode opératoire rationnel, simple, commode d'exécution et, de plus, applicable à des milieux dans lesquels le dosage de l'acide phosphorique, par la méthode céruléomolybdique, était irréalisable.

II — CONDITIONS EXPÉRIMENTALES

Elles concernent le mode opératoire et la préparation des différents réactifs.

1. — *Caractéristiques du mode opératoire*

Nous envisageons le dosage de l'acide phosphorique dans des milieux variés : citrique, acétique, lactique, bicarbonique, aqueux, oxalique, chlorhydrique, perchlorique, sulfurique, sodique et potassique. Mais, quelle que soit la nature du milieu considéré, le mode opératoire comporte les points communs suivants :

a) Les dosages sont effectués sur un volume de 10 ml dans des tubes à essai en pyrex 20-200.

b) La solution finale peut contenir entre 0 et 25 γ de P_2O_5 soit 2,5 γ/ml.

c) La réduction de l'acide phosphomolybdique est obtenue en maintenant les tubes au bain-marie bouillant pendant 10 minutes. Après refroidissement, les solutions sont colorimétrées à leur maximum d'absorption : 8 250 Å, dans des cuves de 1 cm. Il faut noter que la réduction complète de l'acide phosphomolybdique exige un minimum de temps de 5 minutes à 100° et de 12 minutes à 80°. De plus, il convient de préciser qu'après la réduction de la totalité de l'acide phosphomolybdique, la prolongation du chauffage ne modifie pas l'intensité de la coloration bleue.

d) Les gammes sont obtenues en utilisant 0,1 - 0,2 - 0,3 - 0,4 - 0,5 ml d'une solution d'orthophosphate disodique contenant 50 γ de P_2O_5 par ml. La densité optique est de 0,33 pour 1 γ de P_2O_5 par ml ou 0,75 pour 1 γ de P par ml.

e) Si les volumes de prise d'essai sont peu différents les uns des autres, la manipulation comporte trois pipetages :

— la prise d'essai ;

— le réactif sulfomolybdique ;

— la solution d'acide ascorbique.

Nous complétons à 10 ml avec la solution réductrice dont la concentration en acide ascorbique est déterminée d'après l'importance de la prise d'essai. Il y a lieu de préciser que chaque volume de 10 ml ne devra pas contenir moins de 3,5 mg d'acide ascorbique ; par contre, un excès de réducteur n'influence pas les résultats, ce qui justifie les variations de concentration ascorbique d'un terme à l'autre.

f) Dans les séries où nous utilisons un même volume de prise d'essai, la manipulation peut se réduire à deux pipetages, il suffit de mélanger, au moment du dosage seulement, le réactif sulfomolybdique et la solution réductrice.

Ainsi, si nous employons x ml de prise d'essai, y ml de réactif sulfomolybdique et 0,5 ml d'une solution contenant 10 g/l d'acide ascorbique, le volume final sera de 10 ml à condition qu'il y ait dans le milieu $(9{,}5 - x - y)$ ml d'eau.

Lorsque la série comporte $(n - 1)$ solutions à doser, nous versons successivement dans une éprouvette graduée les réactifs suivants :

— $y\ n$ ml de réactif sulfomolybdique,

— $[10 - (0{,}5 + x + y)]\ n$ ml d'eau,

— $0{,}5\ n$ ml de la solution d'acide ascorbique à 10 g/l.

Après quoi, dans chaque tube, nous ajoutons, aux x ml de la prise d'essai, $(10 - x)$ ml de la solution ainsi obtenue.

2. — *Préparation des réactifs*

a) *Réactifs sulfomolybdiques*

Ils sont au nombre de deux. Le premier A est employé pour le dosage de l'acide phosphorique dans les solutions citrique, acétique, lactique, bicarbonique, aqueuse, sulfurique, chlorhydrique, perchlorique sodique et potassique. Le fait de pouvoir modifier sa proportion dans le volume final lui confère de très grandes possibilités d'utilisation. Cependant, sa composition ne permet pas d'opérer avec une précision suffisante en milieu oxalique, aussi, devons-nous prévoir un deuxième réactif B pour le dosage de l'acide phosphorique dans les extraits oxaliques.

RÉACTIF A : Dans un bécher de 250 ml, contenant environ 100 ml d'eau, dissoudre 25 g de molybdate d'ammonium — $Mo_7\ O_{24}\ (NH_4)_6,\ 4\ H_2O$ —.

Dans un bécher de 1 000 ml, ajouter 280 ml de SO_4H_2 pur — $d = 1{,}84$ à environ 200 ml d'eau. Après refroidissement, y verser, lentement et en agitant, la solution de molybdate d'ammonium. Laisser refroidir et compléter à 1 000 ml.

Le réactif ainsi préparé contient 20 g/l de MoO_3 et sa normalité est 10 N. Il est conservé dans un flacon coloré.

RÉACTIF B : Dissoudre 37,5 g de molybdate d'ammonium — $Mo_7\ O_{24}\ (NH_4)_6,\ 4\ H_2O$ —. dans un bécher contenant environ 150 ml d'eau.

Dans un bécher de 1 000 ml, ajouter 280 ml de SO_4H_2 pur — $d = 1{,}84$ — à 200 ml d'eau. Après refroidissement, y verser, lentement et en agitant, la solution molybdique. Laisser refroidir et compléter à 1 000 ml.

Le réactif B contient 30 g/l de MoO_3 et sa normalité est de 10 N. Il est conservé dans un flacon coloré.

b) *Solution d'acide ascorbique*

Elle est en milieu aqueux et sa concentration peut varier d'une méthode à l'autre suivant le volume de prise d'essai utilisé. Généralement, la concentration est comprise entre 1 et 10 g/l.

Les solutions d'acide ascorbique présentent l'avantage de conserver leurs propriétés réductrices pendant plusieurs semaines (BOUVATTIER, 1960).

c) *Solution d'orthophosphate disodique*

Dissoudre 252,2 mg de $PO_4HNa_2,\ 12\ H_2O$ dans un litre d'eau. Cette solution contient 50 γ de P_2O_5 par ml.

III — DOSAGE DE L'ACIDE PHOSPHORIQUE DANS LES SOLS

Nous exposons les modes opératoires applicables aux méthodes d'extraction les plus couramment employées, c'est-à-dire des méthodes utilisant les réactifs d'extraction suivants : acide citrique, acide acétique, acide sulfurique, acide lactique, eau, bicarbonate de sodium, oxalate d'ammonium.

Il faut noter que l'acide phosphorique ne peut être dosé dans un milieu contenant de l'acide nitrique sans destruction préalable de ce dernier. Ainsi, par exemple, il n'est pas possible d'effectuer directement le dosage sur la solution d'extraction de la méthode SCHLŒSING-DE SIGMOND. (DEMOLON, 1952).

1. — *Extraits citriques*

DYER propose l'acide citrique pour les sols acides ou contenant peu de calcaire et AUBERT utilise le citrate d'ammonium dans les sols calcaires.

a) *Acide citrique*

La solution d'extraction contient 20 g/l d'acide citrique et le rapport terre/solution est égal à 1/5 (DEMOLON, 1952).

Dans nos conditions opératoires, le volume de prise d'essai toléré est compris entre 0 et 3 ml. Lorsque le volume est supérieur à 3 ml, nous observons un affaiblissement de la coloration bleue et il est d'autant plus important que le volume est élevé.

Il convient de mettre dans chaque tube :

— 0,5 ml d'extrait citrique. La prise d'essai est de 0,25 ml pour les terres riches en P_2O_5 alors qu'elle peut atteindre 1 ou 2 et même 3 ml dans le cas des terres pauvres,

— 1 ml de réactif sulfomolybdique A,

— Compléter à 10 ml avec une solution d'acide ascorbique à 1 g/l.

Après homogénéisation, les tubes sont portés 10 minutes au bain-marie bouillant, ils sont ensuite refroidis et les solutions sont colorimétrées à 8 250 Å, dans des cuves de 1 cm.

Chaque point de gamme est obtenu en ajoutant 1 ml de réactif sulfomolybdique A à la prise d'essai d'orthophosphate disodique et en complètant à 10 ml avec la même solution d'acide ascorbique.

Rappelons que pour les dosages en série, la manipulation est réduite à deux pipetages :

— 0,5 ml de prise d'essai,

— 9,5 ml d'une solution contenant n ml de réactif sulfomolybdique A et 8,5 n ml de la solution à 1 g/l d'acide ascorbique.

b) *Citrate d'ammonium* (méthode AUBERT)

L'acide phosphorique est extrait par une solution de citrate d'ammonium de de pH 8,2, le rapport terre/solution est égal à 1/10 (AUBERT, 1936).

Le volume de prise d'essai peut également varier entre 0 et 3 ml.

Le dosage est effectué suivant le mode opératoire et avec les réactifs adoptés pour le dosage en milieu citrique à 2 p. 100. Le rapport terre/solution étant plus faible, il convient de prendre un volume de prise d'essai plus élevé mais ne dépassant pas toutefois 3 ml.

2. — *Extraits acétiques*

Les réactifs suivants sont proposés pour l'extraction de l'acide phosphorique :

— solution d'acide acétique à 1 p. 100 ou de normalité 0,17 N environ (DEMOLON et BARBIER, 1930).

— solution d'acide acétique 0,5 N. Ce réactif est utilisé dans certains pays, en particulier en Espagne (GUITIAN–OJEA).

— solution d'acide acétique 0,5 N tamponnée par l'acétate de sodium à pH 4,8, elle est connue sous le nom de solution MORGAN (BARBIER, 1941).

a) *Solutions acétiques* 0,17 N *et* 0,5 N

Le volume de prise d'essai peut varier de 0 à 7,5 ml, aussi, nous proposons le mode opératoire suivant :

— x ml de prise d'essai ($0 < x < 7{,}5$),

— 2 ml de réactif sulfomolybdique A,

— $(7{,}5 - x)$ ml d'eau,

— 0,5 ml d'une solution d'acide ascorbique à 10 g/l.

b) *Solution Morgan*

Elle est utilisée dans le cas des sols calcaires et le rapport terre/solution est égal à 1/40 (GUITIAN–OJEA).

Si nous adoptons le mode opératoire précédent, le volume de prise d'essai ne peut être supérieur à 3 ml sinon il se développe une coloration bleue non spécifique du composé réduit de l'acide phosphomolybdique. Cette limite est portée à 6,5 ml en utilisant 3 ml de réactif sulfomolybdique A.

Le mode opératoire est le suivant :

— x ml de prise d'essai ($0 < x < 6{,}5$),

— 3 ml de réactif sulfomolybdique A,
— $(6,5 - x)$ ml d'eau,
— 0,5 ml d'un solution d'acide ascorbique à 10 g/l.

3. — *Extraits sulfuriques* (méthode TRUOG)

Le réactif d'extraction est l'acide sulfurique 0,002 N tamponné à pH 3 par addition de sulfate d'ammonium. Le rapport terre/solution est égal à 1/200 (BRUNEL, 1948).

La prise d'essai peut varier de 0 à 8 ml.

Il convient de mettre dans chaque tube :
— 8 ml de filtrat,
— 1,5 ml de réactif sulfomolybdique A,
— 0,5 ml d'une solution à 10 g/l d'acide ascorbique.

4. — *Extraits lactiques* (méthode EGNER)

Cette méthode est très utilisée dans divers pays pour le dosage de l'acide phosphorique et de la potasse.

Le réactif d'extraction est préparé de la façon suivante : 152 g de lactate de calcium sont dissous dans un litre d'eau et, après addition de 100 ml de ClH 5 N, le volume est amené à 2 litres. Un volume de la solution ainsi obtenue est dilué avec 25 volumes d'eau (DEMOLON, 1952).

Le rapport terre/solution est égal à 1/50.

Le volume de la prise d'essai peut varier entre 0 et 8,5 ml.

L'addition des réactifs se fait ainsi :
— x ml de prise d'essai $(0 < x < 8,5)$,
— 1 ml de réactif sulfomolybdique A,
— $(8,5 - x)$ ml d'eau,
— 0,5 ml d'une solution d'acide ascorbique à 10 g/l.

5. — *Extraits aqueux* (méthode DEMOLON et *al.*)

Les auteurs extraient l'acide phosphorique par de l'eau pure. Le rapport terre/solution est égal à 1/2 (DEMOLON et *al.*, 1953).

Le volume de prise d'essai peut varier entre 0 et 8 ml et le mode opératoire est le suivant :
— x ml de prise d'essai $(0 < x < 8)$,
— 1,5 ml de réactif sulfomolybdique A,
— $(8 - x)$ ml d'eau,
— 0,5 ml d'une solution à 10 g/l d'acide ascorbique.

N. B. La solution d'extraction contient parfois des colloïdes argileux dont la présence peut perturber la colorimétrie. Leur floculation est obtenue en additionnant à la solution d'extraction, de l'acide chlorhydrique pur dont la normalité est peu inférieure à 12 N.

Afin de pouvoir fixer le volume maximal de ClH pur autorisé par la méthode colorimétrique, nous précisons que la solution finale de 10 ml peut contenir jusqu'à 3,6 ml de ClH N ou 0,3 ml de ClH pur.

La clarification de la solution d'extraction peut aussi être obtenue par une centrifugation.

6. — *Extraits bicarboniques* (méthode TENDILLE)

Pour la détermination du phosphore isotopiquement diluable, l'auteur utilise une solution de bicarbonate de sodium 0,4 M car elle permet d'extraire une fraction importante du mélange isotopique (TENDILLE, 1959).

Le volume de prise d'essai peut varier de 0 à 7 ml et il convient d'opérer de la façon suivante :

— x ml de prise d'essai ($0 < x < 7$),
— 2,5 ml de réactif sulfomolybdique A,
— $(7 - x)$ ml d'eau,
— 0,5 ml d'une solution à 10 g/l d'acide ascorbique.

7. — *Extraits oxaliques* (méthode JORET et HEBERT)

L'acide phosphorique est extrait par une solution d'oxalate d'ammonium 0,2 N. Le rapport terre/solution est égal à 1/25 (JORET et HEBERT, 1955).

Cette méthode s'applique aux sols calcaires.

Jusqu'à présent, le dosage de l'acide phosphorique dans les extraits oxaliques n'a pu être réalisé directement. D'ailleurs, SCHWARTZ, d'une part, et ALIMARIN et ZVEREV, d'autre part, affirment que l'acide phosphomolybdique ne se forme pas dans un milieu contenant de l'acide oxalique (JEAN, 1955). Cependant, la connaissance des normes de validité de la méthode céruléomolybdique nous montre qu'il y a formation d'acide phosphomolybdique en milieu oxalique et, par conséquent, le dosage de l'acide phosphorique est réalisable malgré les propriétés inhibitrices élevées de l'acide oxalique ou des oxalates.

Les caractéristiques du réactif sulfomolybdique B ont été déterminées pour un volume d'oxalate d'amonium 0,2 N compris entre 0 et 1,5 ml. Étant donné le rapport terre/solution choisi par les auteurs, la précision de la colorimétrie exige, en effet, un volume de prise d'essai de 1,5 ml.

Dans les conditions opératoires adoptées, si le volume de prise d'essai est supérieur à 1,5 ml, il se produit un affaiblissement de la coloration bleue d'autant plus intense que le volume est élevé.

L'addition des réactifs se fait de la façon suivante :

— 1,5 ml de prise d'essai ; pour les terres riches en P_2O_5, il est utilisé un volume inférieur,
— 2 ml de réactif sulfomolybdique B,
— 6,5 ml d'une solution à 1 g/l d'acide ascorbique.

Rappelons que pour les dosages en série, la manipulation est réduite à deux pipetages :

— 1,5 ml de prise d'essai,
— 8,5 ml d'une solution contenant $2\ n$ ml de réactif sulfomolybdique B et $6,5\ n$ ml de la solution à 1 g/l d'acide ascorbique.

Dans les sols calcaires, la précipitation de l'oxalate de calcium diminue la concentration oxalique de la solution d'extraction. Mais l'intervention de ce phénomène n'influence pas le dosage car, dans les conditions opératoires prévues, la densité optique, à égalité de concentration phosphorique, est indépendante de la teneur en oxalate de la solution finale.

8. — *Remarques*

a) Dans les sols riches en matière organique, certains réactifs extraient une quantité importante de phosphore organique. Mais la présence de cette forme ne modifie pas le dosage du phosphore minéral car la fraction organique hydrolysée pendant les opérations colorimétriques est nulle ou négligeable. Ainsi, dans les sols de Bretagne, le phosphore organique représente une fraction importante du phosphore total L'acide phosphorique dit « assimilable » est déterminé au moyen de la méthode citrique et les solutions d'extraction des sols cultivés contiennent entre 5 mg/l et 60 mg/l de P_2O_5 sous forme minérale, ce qui correspond à une teneur en acide phosphorique assimilable comprise entre 0,025 p. 1 000 et 0, 300 p. 1 000. Mais, en plus, elles contiennent de 8 à 15 mg de P_2O_5 sous forme organique. Cette importante fraction est éliminée de la solution d'extraction par une filtration sur charbon et il apparaît que les valeurs caractérisant la proportion de phosphore minéral restent inchangées en présence ou en absence de phosphore organique.

En outre, la densité optique à 8 250 Å n'est pas modifiée par la présence dans les solutions d'extraction d'une coloration jaune car le maximum d'absorption de cette dernière se situe vers 4000 Å.

b) Dans les sols très calcaires, le réactif utilisé peut extraire une certaine quantité de calcium. A cet égard, BARBIER signale que les terres renfermant du calcaire facilement attaquable donnent lieu à une effervescence notable en présence du réactif acéto-acétique — solution MORGAN — et il ajoute que la chaux dissoute en neutralisant partiellement SO_4H_2, entraîne l'apparition d'une coloration bleue supplémentaire (BARBIER, 1941).

Pour toutes les méthodes exposées dans cette note, la présence de calcium ne diminue pas la limite supérieure de la prise d'essai. Notons cependant que l'apparition d'un précipité de sulfate de calcium dans la solution finale perturbe la colorimétrie mais il est extrêmement rare d'atteindre le seuil de précipitation de ce sel. Dans cette éventualité, il conviendrait d'opérer avec un volume de prise d'essai plus faible.

IV — DOSAGE DE L'ACIDE PHOSPHORIQUE DES VÉGÉTAUX

Nous exposons d'abord la méthode de minéralisation adoptée avant de considérer le dosage colorimétrique.

1 — *Méthode de minéralisation.*

La destruction de la matière végétale est réalisée au moyen d'une attaque par le mélange nitroperchlorique.

Cette attaque ne présente pas de difficultés et elle ne nécessite pas de précautions particulières à condition d'opérer à des températures peu élevées. Il est, en effet, possible d'obtenir une minéralisation complète de la substance végétale — exception faite pour certaines racines, en particulier, de rutabagas — sans provoquer l'ébullition de l'acide perchlorique. En outre, dans le procédé adopté, nous utilisons un excès d'acide nitrique.

La minéralisation est effectuée dans un vase à concentration ou un bécher de 50 ml. Nous y ajoutons successivement :

— 500 mg de matière sèche,
— 2 ml d'acide perchlorique pur,
— 10 ml d'acide nitrique pur.

Le chauffage au bain de sable étant très doux, l'attaque nitroperchlorique n'exige pas de surveillance et, afin d'éviter un noircissement du mélange pendant la minéralisation, nous plaçons un verre de montre sur chacun des récipients.

Il se produit, en effet, un noircissement lorsque l'acide perchlorique entre en action sur une matière insuffisamment attaquée par l'acide nitrique. Un chauffage très fort au début de l'attaque favorise ce phénomène car le départ de l'acide nitrique est trop rapide. Si la température de chauffage de l'acide perchlorique est maintenue élevée, la présence de cette matière organique carbonisée présente un certain danger (KAHANE, 1934).

La décoloration du liquide marque la fin de la minéralisation, elle est généralement complète au bout de 6 heures. Le chauffage est alors interrompu car nous ne cherchons pas à éliminer l'acide perchlorique. En effet, dans les conditions opératoires adoptées, sa présence ne gêne pas la colorimétrie. Par contre, en maintenant le chauffage pendant plus de 2 heures après le départ des dernières vapeurs perchloriques, nous provoquons des pertes de phosphore.

Après refroidissement, le résidu est repris par une solution perchlorique 0,5 N environ — il est possible aussi d'utiliser SO_4H_2 ou ClH de normalité voisine — puis il est filtré et le volume final est amené à 100 ml. C'est sur cette solution que le dosage de l'acide phosphorique est effectué ; cette dernière peut également servir au dosage du potassium, sodium, calcium, magnésium.

2. — *Colorimétrie*

Le mode opératoire adopté est le suivant :

— 1 ml de prise d'essai,
— 1 ml de réactif sulfomolybdique A,
— 8 ml d'une solution à 1 g/l d'acide ascorbique.

Après homogénéisation, les tubes sont maintenus 10 minutes au bain-marie bouillant, ils sont ensuite refroidis et les solutions sont colorimétrées à 8250 Å dans des cuves de 1 cm.

Chaque point de gamme est obtenu en ajoutant 1 ml de réactif sulfomolybdique A à la prise d'essai d'orthophosphate disodique et en complètant à 10 ml avec la même solution d'acide ascorbique.

3. — *Remarques*

a) Suivant la richesse en acide phosphorique du végétal, la prise d'essai est inférieure ou supérieure à 1 ml. Étant donné la concentration en acide perchlorique de la solution d'extraction — 0,7 N environ — la prise d'essai peut atteindre un volume élevé. Pour plus de précisions, signalons que dans nos conditions opératoires

— 1 ml de réactif sulfomolybdique A et volume de 10 ml — le milieu final peut contenir jusqu'à :

— 6 ml d'acide perchlorique normal,
— 6,5 ml d'acide sulfurique normal,
— 4 ml d'acide chlorhydrique normal,
— 0,005 ml d'acide nitrique normal.

Ainsi, l'acide nitrique possède des propriétés inhibitrices très marquées et il importe d'éviter sa présence même à l'état de traces sinon la coloration bleue risque de disparaître pendant ou après le chauffage.

b) Généralement, la teneur en phosphore des végétaux est exprimée en pour cent de P_2O_5 mais il arrive aussi qu'elle le soit en pour cent de P. Dans le cas où seul ce mode d'expression est retenu, nous pouvons concevoir, afin d'éviter tout calcul de transformation, l'utilisation d'une solution-étalon dont la concentration en orthophosphate est exprimée en pour cent de P. Ainsi, au lieu d'utiliser la solution d'orthophosphate disodique à 50 γ de P_2O_5 par ml, nous employons une solution à 20 γ de P par ml. Elle est obtenue en dissolvant 231,1 mg du même sel dans un litre d'eau. Chaque tube de gamme contient également 0,1 - 0,2 - 0,3 - 0,4 - 0,5 ml soit 2 - 4 - 6 - 8 - 10 γ de P.

c) Dans l'appréciation du taux de phosphore, la silice ne cause pas d'erreur car elle est insolubilisée pendant l'attaque nitroperchlorique (COPPENET et *al.*, 1947). De plus, ce mode d'attaque ne donne pas lieu à une réduction des orthophosphates laquelle est observée au cours de la destruction de la matière végétale par voie sèche. A cet égard, GROSMAN montre que la minéralisation par voie sèche peut conduire à des erreurs importantes du fait qu'une fraction non négligeable de l'acide phosphorique se retrouve dans les cendres à l'état de pyrophosphates (GROSMAN, 1960).

V — DOSAGE DE L'ACIDE PHOSPHORIQUE DES ENGRAIS

La méthode officielle prévoit la solubilisation de l'acide phosphorique par l'acide citrique, le citrate d'ammonium, l'acide chlorhydrique, l'acide sulfurique et l'eau.

Les dosages se font également par gravimétrie et par volumétrie mais la colorimétrie est peu employée. En particulier, il a été souvent constaté qu'une méthode céruléomolybdique était difficilement applicable à tous les réactifs de solubilisation. En effet, la compétition existant entre le phosphomolybdate et les complexes citriques du molybdène constitue un inconvénient important à l'application de cette méthode aux solutions citratées.

Or, les conclusions de notre étude sur la méthode céruléomolybdique montre que cette difficulté est facilement écartée et, par conséquent, l'acide phosphorique des extraits d'acide citrique et de citrate d'ammonium est dosé dans les meilleures conditions de reproductibilité. Aussi, nous proposons un mode opératoire applicable aux différents réactifs de solubilisation de l'acide phosphorique des engrais.

Étant donné le rapport du poids d'engrais utilisé au volume de liquide solubilisant, le dosage ne peut être effectué directement sur la solution d'extraction dont la concentration en acide phosphorique est élevée. Il faut donc prévoir une dilution

de 1/100. Par exemple, nous prendrons 1 ml de la solution d'extraction et nous compléterons à 100 ml avec de l'eau distillée. C'est avec cette solution diluée que la colorimétrie est réalisée.

1. — *Dosage de l'acide phosphorique soluble dans le citrate d'ammonium*

La solution de citrate d'ammonium est préparée à partir de l'acide citrique et de l'ammoniaque : 400 g d'acide citrique sont dissous dans 600 ml d'ammoniaque. Après refroidissement, le volume est complété à 1 litre avec de l'ammoniaque.

Avec une telle solution, dans nos conditions opératoires, le volume de prise d'essai ne doit pas être supérieur aux 2/100 du volume final sinon nous observons un affaiblissement de la coloration bleue, à égalité de concentration orthophosphorique. Mais comme la solution d'extraction est diluée 100 fois dans l'eau, le citrate d'ammonium ne peut, en aucun cas, perturber le dosage.

Le rapport du poids d'engrais au volume de la solution de citrate d'ammonium est égal à 1/100, aussi, après la dilution au centième prévue, nous pouvons fixer le volume x de la prise d'essai en fonction de p, le pourcentage présumé de P_5O_2 solubilisé par ce réactif.

Pourcentage de P_2O_5	Volume de la prise d'essai
$p < 5$ %	$x = 5$ ml
$5 < p < 10$	$x = 2{,}5$ —
$10 < p < 25$	$x = 1$ —
$25 < p < 50$	$x = 0{,}5$ —

Il importe de préciser qu'avec les phosphates précipités et le phospal, le rapport du poids d'engrais au volume de la solution de citrate d'ammonium est égal à 1/200, il convient d'en tenir compte dans le calcul de x en fonction de p.

Le dosage colorimétrique est réalisé en mettant dans chaque tube :

— x ml de prise d'essai,

— 1 ml de réactif sulfomolybdique A,

— $(9 - x)$ ml d'une solution à 1 g/l d'acide ascorbique.

Après homogénéisation, les tubes sont portés 10 minutes au bain-marie bouillant et les solutions sont colorimétrées en cuves de 1 cm à 8 250 Å.

Chaque point de gamme est obtenu en ajoutant 1 ml de réactif sulfomolybdique A à la prise d'essai d'orthophosphate disodique et en complètant à 10 ml avec a solution à 1 g/l d'acide ascorbique.

2. — *Dosage de l'acide phosphorique soluble dans l'eau*

Le rapport du poids d'engrais au volume d'eau étant égal à 1/100, le mode opératoire à suivre est identique au précédent.

3. — *Dosage de l'acide phosphorique soluble dans l'acide citrique*

Le réactif de solubilisation utilisé pour les scories de déphosphoration est constitué par une solution à 2 p. 100 d'acide citrique.

Dans le cas des sols, nous avons vu qu'en employant 1 ml de réactif A dans un volume de 10 ml, le milieu final peut contenir 3 ml d'une solution citrique à 2 p. 100.

Après la dilution au centième de la solution d'extraction, l'addition des réactifs se fait de la façon suivante :

— 1 ml de la solution diluée dans l'eau,
— 1 ml de réactif sulfomolybdique A,
— 8 ml d'une solution à 1 g/l d'acide ascorbique.

4. — *Dosage du phosphore total*

L'acide chlorhydrique est utilisé pour l'attaque de l'engrais et aussi pour la reprise du résidu.

Le rapport du poids d'engrais au volume d'extraction est égal à 1/100. Aussi, le mode opératoire est identique à celui du paragraphe 1.

Dans le cas de l'utilisation du mélange sulfonitrique, il convient de poursuivre l'attaque jusqu'à la disparition complète de l'acide nitrique.

VI — CONCLUSIONS

1. — Ainsi, tous les dosages sont réalisés, sauf en milieu oxalique, avec le même réactif sulfomolybdique. Ce résultat est obtenu grâce à la possibilité de faire varier la proportion de ce réactif dans le volume final.

Le volume de réactif sulfomolybdique utilisé est de 1 ml lorsque la nature de la solution d'extraction tend à provoquer un affaiblissement de la coloration bleue, à égalité de concentration orthophosphorique.

Par contre, si la nature des réactifs d'extraction est plus ou moins favorable à la réduction molybdique, le volume de réactif sulfomolybdique est porté à 3 - 2,5-2 et 1,5 ml. Le but de cette opération est d'empêcher le développement de la coloration bleue spécifique du composé réduit de l'acide molybdique.

Il y a lieu de remarquer qu'il est possible de doser l'acide phosphorique dans des milieux sodique et potassique. Ainsi, un volume final de 10 ml tolère une prise d'essai de 4 ml de NaOH N et 4 ml de KOH N, en utilisant 2 ml de réactif sulfomolybdique A. Si le volume de ce réactif est porté à 3 ml, la prise d'essai peut atteindre 6,5 ml de NaOH N et 6,5 ml de KOH N.

A l'intention des laboratoires utilisant la méthode d'extraction à l'oxalate d'ammonium, il importe de signaler que tous les dosages effectués avec 1 ml de réactif sulfomolybdique A — méthodes citrique et lactique, végétaux et engrais — sont réalisés de la même façon en employant 2 ml de réactif B.

2. — Dans les modes opératoires proposés, le dosage est indépendant des variations de concentration du réactif d'extraction à condition que le volume de la prise d'essai soit toujours compris entre 0 et la valeur maximale précisée dans chaque cas. Par conséquent, il n'est pas nécessaire d'établir les gammes d'étalonnage en présence du réactif d'extraction, il suffit seulement de déterminer les traces éventuelles d'acide phosphorique de la solution extractante.

3. — Au cours du chauffage au bain-marie bouillant, il se développe une légère teinte jaune en présence d'un excès de réducteur. Cette coloration qui se remarque surtout lorsque le volume de réactif sulfomolybdique est élevé, semble due à un composé réduit de l'acide molybdique car elle n'apparaît pas en absence de molybdate.

A égalité de concentration orthophosphorique, la densité optique à 8 250 Å n'est pas modifiée par les variations d'intensité de cette coloration jaune dont le maximum d'absorption se situe à l'autre extrêmité du spectre visible, c'est-à-dire vers 4 000 Å.

4. — La réduction des acides arseniomolybdique et silicomolybdique est aussi caractérisée par le développement d'une coloration bleue. Mais l'influence des arseniates et des silicates n'intervient pas dans le dosage colorimétrique de l'acide phosphorique lorsque le milieu final contient moins de 0,02 mg de As par litre et moins de 20 mg de Si par litre. En conséquence, la quantité maximale de P — environ 1 mg/l — autorisée par la méthode est 50 fois plus élevée que celle de As et 20 fois plus faible que celle de Si :

$$\frac{As}{P} \leqslant \frac{1}{50} \qquad \text{et} \qquad \frac{Si}{P} \leqslant 20.$$

Ces rapports sont valables dans les cas les plus favorables à la réduction des acides arseniomolybdique et silicomolybdique. Dans la plupart des modes opératoires, ils ont des valeurs plus élevées car l'influence des arseniates et des silicates est fonction de l'acidité et de la concentration molybdique du volume final. Ainsi dans les cas limites nous avons :

$$\frac{As}{P} \leqslant \frac{1}{10} \qquad \text{et} \qquad \frac{Si}{P} \leqslant 200.$$

Il apparaît que l'influence de As et de Si n'intervient pas, même dans les conditions les plus favorables à la réduction des complexes correspondants à ces deux éléments, en effet :

— La teneur des sols en arsenic, à part quelques exceptions, est comprise entre 1 et 10 p. p. m. La moyenne de sols analysés et provenant de différents points du globe est de 5 p. p. m. (Vinogradov, 1948).

— La matière sèche des végétaux contient peu d'arsenic. La teneur en As se situe entre 0,09 et 2,95 p. p. m. pour les pommes de terre, choux, betteraves, carottes, tomates... (Shtenberg, 1941), celle de l'orge est toujours inférieure à 4 p. p. m. (Boischot et Tyszkiewicz, 1949). Dans beaucoup de végétaux, de céréales et de fruits, la teneur en As est inférieure à 0,1 p. p. m. (Bagchi et Ganguly, 1941).

— Le pourcentage d'arsenic du superphosphate peut atteindre 0,05 p. 100 mais il est généralement compris entre 0,01 et 0,02 p. 100 (Stutzer, 1901), celui d'un phosphate naturel est d'environ 0,003 p. 100.

— La silice des végétaux est insolubilisée au cours de l'attaque nitroperchlorique (Coppenet et *al.*, 1947).

— Certains extraits de sol peuvent contenir dix fois plus de SiO_2 que de P_2O_5 (Barbier, 1941).

5. — Enfin, bien souvent, la méthode céruléomolybdique n'est considérée valable que pour le dosage de traces d'acide phosphorique. Cependant, lorsqu'elle est utilisée dans les conditions indiquées, son excellente reproductibilité autorise à l'appliquer aux macrodosages. En outre, sa simplicité, sa rapidité d'exécution et son indifférence aux conditions de milieu en font une méthode de choix, non seulement pour les dosages en série, mais aussi pour tous les dosages courants.

Reçu pour publication en mai 1962.

SUMMARY

THE DETERMINATION OF PHOSPHORUS IN SOILS, PLANTS AND FERTILIZERS BY MEANS OF THE MOLYBDENUM-BLUE METHOD

A detailed study was made of the application of the mobybdenum-blue method in agricultural laboratories, including the description of procedures for the determination of phosphorus in different extracts of soils, plants and fertilizers.

The determinations were made by using ascorbic acid as a reducing agent and by heating the solutions over a water bath for ten minutes. A single sulfomolybdate reagent was used for the determination of phosphorus in different media such as water, acetic acid, bicarbonate, citric acid, lactic acid, hydrochloric acid, perchloric acid, sulfuric acid, and sodium and potassium environment. This was achieved by varying the proportions of the sulfomolybdate reagent in the final volume. Another reagent is proposed for the determination of phosphorus in oxalic-acid extracts.

With all the procedures described, the method is unaffected by the conditions of the medium ; furthermore, the method is simple and easily performed and shows a high degree of reproducibility.

ZUSAMMENFASSUNG

CÄRULEOMOLYBDÄNISCHE DOSIERUNG DER PHOSPHORSÄURE IM BODEN, IN DER PFLANZE UND IM HANDELSDUNGER.

Vorliegende analytische Angabe ist die Auswertung in agronomischen Laboratorien einer grundlegenden Studie der cäruleomolybdänischen Methode. Sie zeigt, wie vorgegangen werden muss, um die Phosphorsäure in den verschiedenen Bodenextrakten, Pflanzen und Düngern zu dosieren.

Die Dosierungen geschehen unter Verwendung von Askorbinsäure als Reduktionsmittel und durch Erhitzen der Lösungen im kochenden Wasserbad während zehn Minuten.

Es wird ein einziges sulfomolybdänsaures Reagens für die Dosierung der Phosphorsäure in verschiedenen Medien verwendet (essigsaure, wässrige, doppelkohlensaure, citronensaure, milchsaure, perchlorsaure, sodische und kaliumhaltige). Man erreicht dies, indem man das Verhältnis des sulfomolybdänsauren Reagens im Endvolumen verändert. Es wird noch eine zweites Reagens zur Dosierung der Phosphorsäure in den oxalsauren Extrakten vorgeschlagen.

Die Methode ist in allen angezeigten Operierungsarten den Bedingungen des Mediums gegenüber völlig gleichgültig. Sie ist ausserdem einfach, bequem in der Ausführung und besitzt eine gute Reproduktibilität.

Дозаж фосфорной кислоты почв, растений и удобрений при помощи молибденовой синьки.

Л. ДЮВАЛЬ — (Кэмпэр).

В предлагаемой аналитической заметке разбирается применение в агрономических лабораториях основательно из'ученного метода молибденовой синьки. В ней описываются оперативные способы дозажа фосфорной кислоты в различных вытяжках из почв, растений и удобрений. При этих дозажах необходимо нагревать растворы в течении десяти минут в кипящей водяной бане, при чем возстановителем служит аскорбиновая кислота. Один и тот-же сульфо-молибдат применяется в качестве реактива при дозажах фосфорной кислоты в разной среде : уксуснокислой, водной, дву-углекислой, лимонокислой, молочнокислой, солянокислой, хлорнокислой, сернокислой, натриевой и калиевой. Результат этот был достигнут при помощи изменений пропорций сульфомодибденового реактива в конечном об'еме. Предлагается также и другой реактив для дозажей фосфорной кислоты щавелевокислых вытяжек.

Во всех изложенных оперативных способах, метод этот — нечувствителен к условиям среды. Кроме того он легко воспроизводим и отличается простотой и легкостью проведения.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AUBERT G., 1936. Sur l'appréciation du besoin des sols en acide phosphorique. *Ann. agron.*, 587-594.

BAGCHI K. N., GANGULY H. D., 1941. Arsenic in food. *Indian Med. Gaz.*, **76**, 720-722 (in Bibl. min. elem. Chil. nitr. educ. bur., New York, 1948, 4e édit., **1**, 61).

BARBIER G., 1941. Dosage rapide de l'acide phosphorique et de la potasse dans les sols en vue de fixer la fumure. *Ann. agron.*, 208-222.

BOISCHOT P., TYSZKIEWICZ E., 1949. Absorption de l'arsenic par les plantes. *C. R. Acad. Agric.*, **36**, 678-679.

BOUVATTIER C., 1960. Sur le dosage de l'acide phosphorique dans les sols. *Ann. agron.*, 221-230.

BRUNEL A., 1948. Traité pratique de chimie végétale. *Georges Frère*, édit., Tourcoing, **2**, 385.

COPPENET M., DUCET G., GUERILLOT J., KAHANE E., 1947. Sur la silice de la paille et du grain de blé. *Ann. agron.*, 564-567.

DEMOLON A., BARBIER G., 1930. Contribution à l'étude de l'évolution des phosphates solubles dans les sols minéraux. *Ann. sci. agro.*, 329-233.

DEMOLON A., 1952. Principes d'Agronomie — Dynamique du sol. *Dunod* édit., 392-393, 505-507.

DEMOLON A., BOISCHOT P., LAJON J., 1953. Réaction des divers sols à l'apport des engrais phosphatés solubles, son importance dans l'établissement des fumures. *Ann. agron.*, 291-330.

GROSMAN R., 1960. Observations sur le dosage de l'acide phosphorique dans les végétaux. *Ann. agron.*, 357-360.

GUITIAN-OJEA F. (Communications personnelles).

JEAN M., 1955. L'analyse colorimétrique dans la série des hétéropolyacides. *Chim. Anal.*, **37**, 125-135.

JORET G., HEBERT J., 1955. Contribution à la détermination du besoin des sols en acide phosphorique. *Ann. agron.*, 233-299.

KAHANE E., 1934. Action de l'acide perchlorique sur les matières organiques et ses applications analytiques. *Hermann et Cie*, édit. Paris.

SHTENBERG A. I., 1941. Natural arsenic content of some végetables and fruits. *Voprosy Pitaniya*, **10**, 29-33 (in Bibl. min. élem., Chil. nitr. éduc. bur., New York, 1948, 4e édit., **1**, 84).

STUTZER A., 1901. Is the arsenic in superphosphates harmful? *Deut. Landw. Pres.*, **28**, 61 (in Bibl. min. elem., Chil. nitr. educ. bur., New York, 1948, 4e édit., **1**, 86).

TENDILLE C., 1959. Sur les mouvements de diffusion des ions phosphoriques dans les particules du sol étudiés à l'aide de ^{32}P. *Bull. Ass. Fr. Et. Sol*, 527-534.

VINOGRADOV A. P., 1948. Arsenic in the soils of the U. S. S. R. *Pedology*, **1**, 33-38 (in Bibl. min. elem., Chil. nitr. educ. bur. New York, 1951, 4e édit., **2**, 6).

Ann. agron., 1962, **11** (5), 483-489.

631. 423. 3 : 546. 22

UNE MÉTHODE NÉPHÉLOMÉTRIQUE RAPIDE POUR LE DOSAGE DU SOUFRE DANS LES SOLS. QUELQUES RÉSULTATS DE DOSAGES DE SOUFRE DANS DES SOLS DE LA SEINE-MARITIME

E. JOUIS, Marie-Thérèse LECACHEUX
Station agronomique, Rouen (Seine-Maritime)

SOMMAIRE

Les Auteurs ont adapté aux analyses de sols en série, une méthode néphélométrique de dosage des sulfates, dans laquelle le SO_4Ba formé est finement maintenu en suspension par adjonction d'un tensio-actif, le Tween 20.

Ils dosent ainsi le soufre des sulfates solubles à l'eau, le soufre lié à la matière organique après destruction par H_2O_2, et une partie des composés soufrés insolubles par attaque finale par HCl concentré à l'ébullition.

La méthode permet aussi un dosage facile du soufre dans les eaux et éventuellement dans les plantes.

Les Auteurs terminent par un aperçu sur les teneurs en soufre trouvées dans des sols de limon et des sols alluviaux du département de la Seine-Maritime.

INTRODUCTION

Après des études importantes consacrées aux éléments fondamentaux N-P-K, les agronomes se préoccupent de plus en plus des éléments secondaires : magnésie, soufre... et des oligo-éléments.

En ce qui concerne le soufre sous ses différentes formes : sulfates solubles, sulfates peu solubles ou insolubles dans l'eau, soufre lié à la matière organique, rappelons qu'il n'était pas d'usage jusqu'à ces dernières années de le doser dans l'analyse courante des sols.

Une des raisons était qu'il n'avait pas été élaboré de méthodes de routine donnant assez rapidement, avec une approximation suffisante, les teneurs en soufre cherchées.

Le but de la présente note est de présenter une telle méthode, mise au point à la Station agronomique de Rouen, au cours des deux dernières années pour l'étude des sols du Petit-Caux et de la Vallée de Seine, ainsi que pour des recherches sur le soufre dans la lutte contre la Gale commune de la Pomme de terre.

MÉTHODE

Principe de la méthode

L'origine de notre mise au point est l'article de P. Blanc et coll. sur une semi-microméthode de dosage des sulfates, paru dans « Chimie analytique » de septembre 1955.

La caractéristique principale de cette semi-microméthode est la stabilisation d'une fine suspension de sulfate de baryum par un produit tensio-actif adéquat, soluble dans l'eau.

Les auteurs ont trouvé que le Tween 20 qui est un monolaurate de polyhydroxy-éthylsorbitol, fabriqué par l'Atlas Powder Company, convenait parfaitement dans ce but.

On précipite donc les traces de sulfates solubles à doser, en milieu légèrement chlorhydrique, par une solution de sulfate de baryum contenant une certaine quantité de Tween 20. Le précipité formé, fin et de grosseur constante, reste en suspension pendant un temps suffisant pour permettre une mesure correcte d'opacité, en lumière bleue, dans un bon photomètre.

Entre 0 et 50 mg de SO_4 par litre, la courbe d'absorption est une droite.

Dans toutes les manipulations qui vont suivre, il faut employer des réactifs très purs et en particulier exempts de sulfates ou autres composés soufrés.

Les traces éventuelles de S seront déterminées par un essai à blanc de tous les réactifs et la valeur du blanc retranchée des résultats des dosages de sols.

Dosage des sulfates solubles dans l'eau

Porter 50 grammes de sol séché à l'air dans une allonge cyclindrique d'environ 250 ml munie à la base d'un robinet puis d'un tube de 15 à 20 cm de long. Obstruer au préalable le fond de l'allonge par un tampon d'ouate.

Faire passer lentement, en réglant le robinet, de l'eau pure (déminéralisée) jusqu'à recueillir 250 ml dans une fiole jaugée placée sous l'allonge.

Le liquide est généralement un peu trouble (argile) et coloré (humus).

Après homogénéisation, centrifuger environ 100 ml du filtrat, en présence d'une petite cuillerée d'alumine hydratée pure (0,5 à 1 g) (Prolabo 20984) et de 4 gouttes d'acide chlorhydrique environ N (HCl au 1/10).

En général, après quelques minutes à 5 000 tours, le liquide est éclairci. On décante sur filtre très serré, car il faut utiliser un liquide absolument exempt de particule en suspension.

Si l'extrait primitif est peu coloré par la matière organique, on obtient un liquide incolore. Si la matière organique soluble est importante, il faut utiliser un charbon actif pur, qui possède un plus grand pouvoir décolorant. S'assurer au préalable qu'il ne cède ni ne retient l'anion SO_4.

On peut également tenir compte d'une légère coloration restant après centrifugation comme nous l'indiquerons plus loin.

Prélever une partie aliquote du centrifugat, en rapport avec la teneur en sulfates préumée ou connue par un essai préalable approximatif.

En l'absence de renseignements, prélever 40 ml = 8 g de terre et les porter dans une fiole jaugée de 50 ml. Ajouter 1 ml de HCl environ N et 4 ml d'une solution de $BaCl_2$ à 10 p. 100 tweenée.

(10 grammes de $BaCl_2$ pur, dissout dans de l'eau pure et amené à 100 ml. Ajouter ensuite 20 ml de tween 20 (Serlabo). Mélanger.

Agiter, compléter le volume à 50 ml, homogénéiser et laisser au repos environ 15 minutes. Le précipité se forme dès le début et reste impalpable.

Mesurer l'opacité de la suspension en lumière bleue. Avec le photomètre Jean et Constant, nous employons une cuve de 4 cm et une longueur d'onde de 400 mμ.

Passer en comparaison pour faire le zéro une solution aqueuse contenant la même quantité de HCl et de solution $BaCl_2$ tweenée.

Établir une droite d'étalonnage à l'aide d'une solution de sulfate de potassium dont 1 ml vaut 10 γ de S.

Les résultats sont normalement reproductibles entre 50 et 200 γ de S dans 50 ml de solution. Toutefois, si l'on désire une grande précision on pourra intercaler dans chaque série 3 étalons de 50 100 et 200 γ de S pour 50 ml et on déduira les résultats, pour la série, de la droite passant par les 3 points représentatifs de ces étalons.

Si par exemple, l'opacité pour un dosage correspond à l'opacité d'un étalon à 120 γ de S dans 50 ml de solution, cela signifie — pour un prélèvement de 40 ml = 8 g de sol - que ces 8 grammes ont abandonné 120 γ de S des sulfates solubles à l'eau, soit $120 \times 1\,000/8 = 15\,000\ \gamma/kg = 15$, mg/kg de S, soit 15 p. p. m.

Si un résultat de dosage dépasse 200 γ dans 50 ml, on recommence, après dilution appropriée du liquide centrifugé.

Dans le cas d'un centrifugat limpide, mais légèrement coloré, on peut remplacer la précédente solution de zéro du photomètre par la solution de dosage sans $BaCl_2$. Par exemple, dans un ballon de 50 ml on portera la partie aliquote choisie comme pour le dosage proprement dit, puis 1 ml HCl environ N puis 4 ml d'une solution composée de 100 ml d'eau plus 20 ml de Tween.

Toutefois comme la légère coloration de Tween évolue un peu avec le temps, il faudra préparer cette solution non barytée en même temps que la solution barytée, et la conserver de la même façon à l'abri de la lumière.

Soufre solubilisé par l'eau, lié a la matière organique

Dans le prédécent dosage, la matière organique est éliminée par adsorption pendant la centrifugation, ou compensée optiquement, ce qui fait que l'on obtient uniquement le soufre des sulfates solubles.

Si l'on veut déterminer le soufre lié à la matière organique entraînée par l'eau, il faut détruire cette matière organique pour mettre le soufre en liberté et l'oxyder en sulfate. On dosera alors l'ensemble sulfates solubles plus sulfates du soufre organique solubilisé, d'où cette dernière valeur par différence.

Prélever le même volume de centrifugat que pour le dosage des sulfates solubles, par exemple 40 ml. Porter dans un bécher de 100 ml. Ajouter environ 10 gouttes d'eau oxygénée pure (électro-Prolabo) 130 volumes. Porter à l'ébullition quelques minutes jusqu'à décoloration complète. Il y a en même temps floculation des traces d'argile en suspension.

Filtrer sur un filtre serré au-dessus d'un ballon de 50 ml — laver — continuer comme ci-dessus: 1 ml HCl + 4 ml solution barytée tweenée, etc.

La déviation au photomètre est normalement un peu supérieure à la déviation obtenue sans l'action de l'eau oxygénée. Généralement de quelques pourcent à 20 p. 100 en plus — Pour des solutions très chargées en matière organique on peut avoir un dépassement de 50 p. 100 et plus.

Soufre attaquable par l'eau oxygénée (S organique)

Reprendre environ 10 g de terre humide dans l'allonge. La sécher complètement à 103° Ne pas attendre pour faire ce prélèvement car dans l'allonge la terre humide fermente peu à peu. Peser 1 g de terre sèche. Porter dans un bêcher de 100 ml. Ajouter environ 10 ml d'eau et 5 ml d'eau oxygénée à 130 volumes.

Couvrir d'un verre de montre et chauffer doucement au bain de sable pendant un temps variable — quelques heures — jusqu'à décoloration complète du liquide surnageant.

Maintenir ce liquide aux environs de 10 ml par addition d'eau. Pour les terres riches en humus on doit ajouter quelques millilitres supplémentaires d'eau oxygénée après 2 ou 3 heures.

Le sol peut rester assez coloré (fer) et même parfois le liquide, malgré une attaque poussée. Dans ce cas, on opérera une compensation optique comme indiqué ci-dessus.

Après attaque, transvaser dans un tube conique à centrifuger de 20 ml utiles, rincer, centrifuger quelques minutes à 5 000 tours. Filtrer sur un ballon de 50 ml. Diluer le culot dans environ 10 millilitres d'eau, Centrifuger à nouveau et décanter sur le filtre. Rincer. Compléter à 50 ml.

Prendre une partie aliquote en rapport avec la quantité d'humus. Par exemple 25 ml pour les terres à 1,5 p. 1000 d'azote total ; 40 ml pour des sous-sols, mais 5 ml pour des sols de prairie et beaucoup moins pour des sols tourbeux.

Ce prélèvement est déposé dans une fiole de 50 ml. Ajouter 1 ml HCl N et 4 ml de solution barytée tweenée puis continuer comme précédemment.

Pour les sols très humifères il est bon de reprendre le culot de centrifugation et de procéder à une nouvelle attaque par H_2O_2. On peut ainsi retrouver 1 à 2 p. 100 de soufre organique en plus.

Bien entendu, procéder à un dosage à blanc sur tous les réactifs et déduire éventuellement la valeur du blanc des résultats. Si l'on opère avec de l'eau et des réactifs bien purs cette valeur est très faible (1 ou 2 division de photomètre). Il est d'ailleurs assez facile de se rendre compte à l'œil du plus léger trouble, en regardant le ballon, éclairé latéralement, sur un fond noir.

Soufre restant, solubilisable par l'acide chlorhydrique

Quand on attaque un sol directement par de l'acide chlorhydrique assez concentré, comme dans le procédé Bertrand, on obtient une quantité élevée de soufre parce que la matière organique est en assez grande partie hydrolysée, décomposée.

Quand, au contraire, on utilise l'acide chlorhydrique après un lessivage à l'eau et une décomposition poussée de la matière organique par l'eau oxygénée, il ne reste que les sulfates insolubles à 'eau par exemple SO_4Ba, un peu de matière organique très résistante, ou enrobée par du carbonate de chaux dans les sols crayeux et parfois des sulfures insolubles.

On récupère une grande partie sinon la totalité de ce soufre restant en effectuant l'attaque suivante :

Le culot de centrifugation du dosage précédent est transvasé dans un bécher de 100 ml. Ajouter 5 ml d'acide chlorhydrique pur (12 N) pour un total de 20 à 25 ml de liquide. Couvrir d'un verre de montre et porter 20 m à douce ébullition au B. S.

La terre se décolore complètement mais la solutio1 surnageante est très colorée (fer...).

Filtrer au-dessus d'un bécher de 100 ml. Évaporer à sec pour insolubiliser la silice. Reprendre par un peu d'eau acidulée (1 ml HCl N et 40 ml d'eau).

Passer ce liquide sur une petite colonne de résine cationique H^+ qui retient le fer et d'autres cations. Laver la résine jusqu'à neutralité de l'effluent. On peut utiliser l'indicateur rouge de méthyle/vert de bromocrésol dont la teinte est neutre pour pH 5,1.

Il ne faut pas que la solution qui traverse la résine soit trop acide, sans quoi les cations seraient mal retenus. Toutefois, le fer est le cation le mieux arrêté, même si d'autres cations passent en partie dans l'effluent. Nous utilisons une colonne de 1,5 cm de diamètre et de 15 cm de hauteur, garnie d'Allasion C. S. préalablement lessivée par HCl pur à 10 p. 100 en poids (10 ml d'acide 12 N dans 35 ml de solution) puis rincée à l'eau pure jusqu'à neutralité.

L'effluent pour le dosage est reçu dans une fiole de 50 ml. Si par hasard ce volume est dépassé, évaporer pour revenir à 50 ml.

La solution doit être parfaitement incolore et transparente.

Après jaugeage, prélever une partie aliquote de 25 ml que l'on porte dans un nouveau ballon de 50 ml. Ajouter alors 1 ml HCl environ N, 4 ml de solution barytée tweenée et terminer comme précédemment.

Il est évident qu'en cas de présence importante de sulfate de baryum dans le sol, celui-ci serait mal dosé puisqu'il reprécipiterait au moment de l'insolubilisation de la silice. Nous comparerons ultérieurement la somme des soufres obtenus par les attaques successives décrites, avec le soufre total par combustion en tube de quartz.

Si la terre est fortement calcaire, on constate assez souvent qu'il reste un peu de matière organique attaquable à l'eau oxygénée, après l'action de l'acide chlorhydrique.

Durée de l'analyse

En admettant un temps de lessivage de 3 heures pour une terre de limon, il est facile de mettre en route une série de terres le matin et d'effectuer les dosages au début de l'après-midi du jour A.

Pour une petite série, on peut admettre environ une demi-heure depuis le prélèvement du liquide aqueux jusqu'au résultat après opacimétrie.

Pour les terres argileuse, on aura intérêt à mélanger le sol avec une certaine proportion de sable pur, afin de diminuer le temps de lessivage.

Le soufre organique se fait, dans notre méthode, après séchage complet du sol lessivé. Ce séchage peut s'effectuer à l'étuve pendant la nuit. Dans ces conditions l'attaque par l'eau oxygénée a lieu le lendemain matin — jour B — et le dosage l'après-midi.

Si l'on termine par une attaque chlorhydrique, celle-ci pourra s'effectuer dans l'après-midi du jour B avec dosage ce même jour ou dans la matinée du jour C.

Précision

Le dosage des sulfates solubles est assez précis, environ 5 p. 100. Notons en passant que l'on ne dépasse pas 2 p. 100 d'erreur pour le dosage du S dans l'eau de pluie, par exemple 5 mg/l $\pm$ 0,1.

Les dosages du soufre organique sont un peu moins bons à cause de la résistance plus ou moins

grande de la matière organique. Pour les sols moyennement humifères, on peut admettre une reproductibilité à moins de 10 p. 100 près, par exemple 150 p.p.m. ± 15 p.p.m. sur le même échantillon.

Il faut se rappeler aussi que, dans un champ, les teneurs en soufre sont variables suivant l'espace, la profondeur et le temps.

RÉSULTATS

Les teneurs en sulfates solubles sont très variables à la fois en quantité, en profondeur et dans le temps.

Des sols pauvres en matières organiques ne recevant pas d'engrais sulfatés et ne se trouvant pas sous le vent d'usines ou de villes, peuvent contenir moins de 1 p.p.m. (1 mg/kg) en S, en surface comme en profondeur. Nous en avons trouvé quelques cas.

Pour des sols en culture en limon des plateaux de régions non industrielles (Petit-Caux) on trouve généralement 2 à 12 p.p.m. en surface. Entre la surface et 1,20 m il arrive souvent de remarquer un maximum à une profondeur déterminée. Par exemple, un sol de labour situé à Grèges (S.-M.) a fourni 6 p.p.m. en surface, 2 p.p.m. à 35 cm, mais 106 p.p.m. à 90 cm. Il y a eu manifestement entraînement en profondeur d'un apport antérieur d'engrais sulfaté.

Les sols sableux d'alluvions anciennes sont naturellement assez pauvres, moins de 5 p.p.m. en surface, sauf si les sols sont un peu humifères ou s'il y a apports récents d'engrais sulfatés.

Les sols d'alluvions modernes de la Vallée de Seine sont aux alentours de 5 p.p.m. sauf pour quelques sols assez riches pour des raisons déjà indiquées.

Les sols tourbeux, cultivés de la Vallée de Basse-Seine sont nettement plus riches 30 à 100 p.p.m. et plus en surface. Cela tient naturellement à la grande masse de, matière organique qui stocke du soufre mais qui le libère à nouveau quand la culture accélère la destruction de l'humus.

Dans le cas du *soufre solubilisé par l'attaque à l'eau oxygénée,* on remarque une corrélation très nette avec la teneur en matière organique, donc également avec l'azote.

Dans les sols de labour du Petit-Caux, peu humifères, il semble que l'augmentation du soufre soit de l'ordre de 95 mg par kg de sol pour 1 p. 100 de matière organique. Mais la droite de régression ne passe pas par l'origine des coordonnées.

Par contre, dans les sols humifères de la vallée de Basse-Seine, ce rapport descend à 55 mg/kg de sol pour 1 p. 100 de matière organique, mais avec passage de la droite représentative par l'origine.

Ce sont là des ordres de grandeur qui demandent à être confirmés par un plus grand nombre d'analyses.

Quoi qu'il en soit, on constate que le soufre organique (H_2O_2) varie entre 10 et 100 mg par kg de terre fine sèche pour les limons pauvres en humus (moins de 2 p. 100) — de 100 à 200 mg pour les limons moyennement humifères (2 à 3 p. 100) et augmente encore pour les limons bien pourvus en matière organique.

Les terres riches en matières organiques de la Vallée de Basse-Seine contiennent naturellement de grosses réserves de soufre. Ainsi un sous-sol de prairie de pH 6,8 à 68,5 p. 100 de matère organique (région d'Heurteauville), a fourni 4,2 g par kg de « terre ». Dès que les sols nettement humifères sont tant soit peu cultivés, le soufre soluble abonde, ainsi que nous l'avons montré plus haut.

Le *soufre restant, solubilisé par l'acide chlorhydrique,* est assez variable. Comme le soufre soluble à l'eau, sa répartition en profondeur n'est pas prévisible, mais en général, les changements d'une couche à l'autre sont moins brusques que pour les sulfates solubles.

On aura, par exemple, pour des labours du Petit-Caux, des suites telles que 32 p.p.m. en surface, 43 à 35 cm et 24 à 90 cm. Un autre sol a fourni 78-41-64 p.p.m., etc. Par contre, on a trouvé aussi 94 p.p.m. en surface puis des traces à 35 cm et 48 p.p.m en surface puis des traces à 435 cm et 48 p.p.m. à 95 cm.

Comme l'ordre de grandeur pour ces limons du Petit-Caux, est de 30 à 70 p.p.m. en surface, on conçoit que le rapport du soufre soluble,et organique au soufre solubilisé ensuite par HCl soit changeant en fonction de la teneur en humus.

Par contre, en profondeur, le soufre HCl devient prépondérant. Par exemple, un sol en betteraves, à Tourville-la-Chapelle, a fourni S-eau/S-H_2O_2/S-HCl = 10/130/78 en surface contre 2/76/41 à 30 cm et 3/11/64 à 1 mètre. On remarque l'abaissement normal du soufre organique en profondeur et une certaine constance du soufre peu soluble.

Étant donné que nous n'avons pas étudié la nature des composés ainsi solubilisés par l'acide chlorhydrique concentré bouillant, nous ne nous étendrons pas plus avant sur ces résultats dans la présente note.

CONCLUSION

La question du soufre engrais, posée depuis longtemps en agronomie, reçoit aujourd'hui, grâce aux progrès de la chimie analytique, des moyens de résolution par analyse en série, des sols et des plantes.

Parmi les méthode possibles pour les sols nous avons ajusté un procédé néphélométrique qui nous paraît suffisamment rapide et précis pour les prospections et les contrôles.

Ce procédé est également valable pour les eaux et dans beaucoup de cas pour les plantes.

Recu pour publication en mai 1962.

SUMMARY

A RAPID NEPHELOMETRIC METHOD FOR DETERMINING SULPHUR IN SOILS

Agriculture's old-time problem of sulphur fertilizing may now be solved, due to the progress in analytical methods, by serial determinations on soils and plants.

Among the possible methods applicable to soils, a nephelometric method was developed to provide sufficiently rapid and precise determinations and means of control. The method is equally useful with waters and with most plants.

ZUSAMMENFASSUNG

EINE NEPHELOMETRISCHE SCHNELLMETHODE ZUR DOSIERUNG DES SCHWEFELS IM BODEN

Heute erfährt die schon lang gestellte Frage über Schwefel als Düngemittel dank der analytischen Chemie ihre Lösung durch Serienanalysen der Böden und Pflanzen.

Unter den für Böden in Betracht kommenden Methoden haben wir ein nephelometrisches Verfahren angepasst, das uns für Untersuchungen und Kontrollen genügend rasch und genau erscheint.

Das Verfahren ist auch für Gewässer und in vielen Fällen für die Pflanzen gültig.

Скорый нефелометрический метод для дозажа серы в почвах.

Э. ЖУИ и Мария-Тереза ЛЕКАШЕ — (Руан).

Вопрос серы — как удобрения, привлекавший уже давно внимание агрономов, получил наконец, благодаря прогрессу аналитической химии, способы разрешения с помощью серийных анализов почв и растений.

Среди всевозможных методов анализа почв, авторам удалось уточнить метод нефелометрический, кажущися им достаточно скорым и точным для проспекций и контроля.

Метод этот может также быть применен для анализа вод, и во многих случаях — для растений.

ANNALES

AGRONOMIQUES

VOL. 13 - n° 6 - 1962

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

Reproduction, même partielle, interdite sans autorisation des auteurs et de l'Institut national de la Recherche agronomique.

Ann. agron., 1962, **13** (6), 493-522

551. 573 : 551. 526

ÉVAPORATION RÉELLE DE DIFFÉRENTS COUVERTS VÉGÉTAUX BIEN ALIMENTÉS EN EAU ET ÉVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE. DÉTERMINATION EXPÉRIMENTALE

M. ROBELIN

Station d'Agronomie, Centre de Recherches agronomiques du Massif Central, Clermont-Ferrand (Puy-de-Dôme)

SOMMAIRE

Une étude expérimentale conduite sur évapotranspiromètres a permis de vérifier l'exactitude du concept d'évapotranspiration potentielle. Cependant la réalisation effective de cette valeur caractéristique de l'équilibre microclimatique local exige un couvert de densité suffisante et présentant un bon état d'activité ; sa détermination expérimentale exige donc certaines précautions ; en particulier les cultures prairiales utilisées généralement montrent une évapotranspiration réduite au moment des coupes. De même l'évaluation du besoin en eau des cultures ne peut se faire sur la seule connaissance de l'E. T. P ; l'erreur commise si l'on acceptait cette proposition rend absolument vaine la recherche d'une méthode de calcul précise de la valeur de référence.

Parmi différentes formules mises au point pour l'estimation de l'évapotranspiration, celle de BOUCHET semble la mieux adaptée en ce qui concerne E. T. P., les formules de PENMAN, TURC, THORNTHWAITE permettent, dans le contexte expérimental, une évaluation acceptable des besoins globaux de certaines plantes annuelles.

INTRODUCTION

« La quantité d'eau perdue par évaporation et transpiration sur une surface portant une couverture végétale bien alimentée en eau est indépendante de la nature du végétal couvrant le sol et relève essentiellement des facteurs physiques caractérisant le pouvoir évaporant de l'atmosphère. »

Cet énoncé paraît séduisant pour résoudre le problème de l'alimentation en eau des cultures ; il implique en effet que la consommation peut être calculée à partir des données climatiques.

Admettant un tel concept, de nombreux chercheurs se sont attachés à la détermination des rapports entre cette Évapotranspiration « plafond » dite « potentielle »

et le climat. La plupart d'entre eux (THORNTHWAITE, 1948, BLANEY et CRIDDLE, 1952 ; TURC L., 1961) ont établi des corrélations entre quelques grandeurs météorologiques couramment mesurées et des valeurs observées de l'évapotranspiration, leur préoccupation essentielle étant d'obtenir un ajustement acceptable dans le plus grand nombre de cas et facilement utilisable. PENMAN (1948) par contre, base le calcul de l'évapotranspiration potentielle sur le bilan d'énergie disponible pour l'évaporation d'une nappe d'eau libre ; le raisonnement paraît beaucoup plus rigoureux ; en réalité la méthode fait appel, pour la solution pratique du problème, à différents ajustements préétablis. Une des plus récentes tentatives est celle de BOUCHET (1960) qui ramène la mesure à celle de l'évaporation d'une surface modèle, en l'occurence l'évaporomètre de *Piche*, corrigée en fonction de la température. On passe de l'évaporation de la « nappe d'eau libre » (PENMAN) ou du « Piche corrigé » (BOUCHET) à l'évapotranspiration potentielle en introduisant des coefficients expérimentaux.

En somme il n'est pas possible, dans l'état actuel de nos connaissances, de construire une formule de calcul *in abstracto* ; en essayant de placer, par hypothèse, le phénomène dans un cadre physique, on peut ne éluder en dernière analyse l'interférence possible de mécanismes vitaux, et tous les auteurs, quel que soit leur point de départ, ont recours à la référence expérimentale. Dans la pensée de la grande majorité, le rôle éventuel des différents couverts végétaux reste purement physique et dépend de légères variations dans les coefficients de réflexion ou bien de facteurs géométriques particuliers à tel ou tel type de plante ; ces facteurs sont minimisés, sans toutefois l'appui de démonstrations expérimentales. Quelques-uns sont extrêmement prudents et admettent que les formules de calcul aboutissent à des valeurs moyennes autour desquelles de notables fluctuations peuvent se produire, en fonction du stade végétatif (pointe de transpiration), ou bien encore par suite d'une insuffisance de la vitesse de transfert de l'eau dans la plante (déficit de transpiration malgré des disponibilités en eau satisfaisante). BOUCHET parle même de l'évapotranspiration potentielle de l'air et non de l'ETP d'une surface. On constate d'autre part dans les formules ayant pour base expérimentale des champs d'essai d'irrigation (BLANEY et CRIDDLE, 1952 ; HARGRAEVES G. H., 1956) l'introduction de « coefficients plantes » très différenciées entre eux et variables dans le temps (HARGREAVES P. H.).

Ces restrictions plus ou moins nettement exprimées sont de nature à mettre en doute le concept de départ.

Dans les essais rapportés ici, nous cherchons à contrôler les limites de validité de cette notion d'évapotranspiration potentielle et à tester ses possibilités d'utilisation pratique.

MÉTHODE

Nous voulons comparer, sous conditions climatiques communes, les consommations d'eau de différentes cultures placées dans des conditions d'alimentation optima. Nous avons choisi pour contrôler ces valeurs, la méthode des évapotranspiromètres proposée par THORNTHWAITE ; l'établissement des bilans hydriques en champ d'irrigation nous paraissait comporter une erreur expérimentale excessive pour le but poursuivi.

La méthode adoptée n'est pas exempte non plus de critiques théoriques. Pour certains (PENMAN H. L., 1948 ; THORNTHWAITE C. W.,) le concept mis en cause implique en effet que l'E. T. P. n'est caractérisable qu'en un point placé dans un environnement identique à lui-même (nature du couvert, alimentation en eau), de telle sorte que cet environnement tamponne complètement les

effets de bordures et que l'évapotranspiration mesurée corresponde uniquement à l'énergie disponible en ce point, étant exclus les transferts d'énergie non utilisée dans le voisinage ; ce résultat est obtenu sous nos climats avec une surface d'environnement de 1 are ou 1 ha selon les auteurs (TURCL. 1961 ; BOUCHET R. J., 1961). THORNTHWAITE C. W. souligne en particulier qu'il est inacceptable de mesurer l'Évapotranspiration Potentielle de couverts distincts sur des évapotranspiromètres contigus.

Des impératifs techniques, en particulier la surface de terrain disponible et le problème de l'approvisionnement en eau, nous ont fait adopter un dispositif bâtard tel que schématisé en Annexe I. Chaque élément de mesure, constitué par une cuve cylindrique de 3 m² de surface, est situé au centre d'un carré de 6 m de côté, cultivé comme la cuve elle-même. Nous pensons que cet environnement réduit est cependant suffisant pour tamponner les effets de bordure que peuvent faire naître l'un sur l'autre les éléments différenciés voisins.

L'environnement général est constitué par une parcelle de 1,5 ha qui, au cours du temps, porta soit du maïs soit des pépinières de noyer. Un plan d'eau oscillant entre 1,20 et 1,50 m de profondeur maintient des conditions d'approvisionnement à peu près satisfaisantes sur la plus grande surface de la parcelle. Les premiers bâtiments de la ville de Clermont-Ferrand sont situés à une cinquantaine de mètres ; nous avons là un élément de perturbation climatique important (l'Annexe I précise le site). Nous pouvons à priori penser que les valeurs mesurées ne correspondront pas exactement aux Évapotranspirations potentielles décelables dans les conditions théoriques invoquées par PENMAN et THORNTHWAITE.

Technique de mesure

L'évapotranspiration mesurée pendant l'unité de temps est donnée par l'équation :

$$ET = P + I_n + \Delta S - D \qquad (1)$$

où P = pluie en mm,
I_n = quantité d'eau fournie par la nappe, en mm,
ΔS = variation du stock d'eau supendu au-dessus du plan d'eau (0 à 20 mm),
D = drainage en mm.

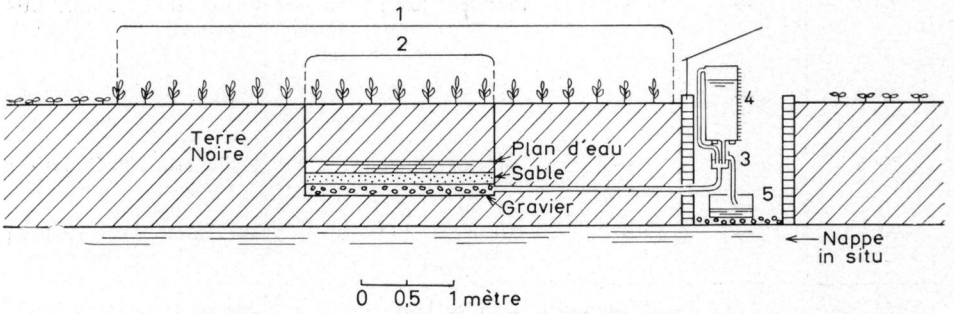


FIG. 1. — *Schéma d'un évapotranspiromètre*

1 Surface de culture homogène
2 Cuve de l'évapotranspiromètre (cylindrique ; tôle galvanisée 3 mm épaisseur)
3 Système de régulation du niveau
4 Réservoir d'alimentation (contenance 90 l)
5 Réservoir de drainage (contenance 50 l)

Aucune irrigation de surface n'a été fournie pendant les trois premières années de mesure (1956-57-58), de sorte que les bilans mensuels établis sont connus à ΔS mm près soit à 20 mm près en prenant la ΔS maxima. Cette marge d'incertitude peut paraître importante ; en fait elle n'a de conséquence que sur la valeur absolue de l'E T ; pour les comparaisons entre couverts, cette inconnue peut être négligée car les variations d'humidité du sol dans les différentes conditions sont parallèles sinon égales pendant l'unité de temps considérée ; nous avons constaté expérimentalement que les différences d'assèchements $\delta\Delta S$ entre deux couverts déjà bien développés étaient au maximum de 3 mm et le plus fréquemment entre 1 et 2 mm. Au cours des années 1959-60-61 nous avons cependant pratiqué des irrigations à la fin de chaque période prise comme unité de temps. Le bilan s'établit alors comme suit :

$$ET = P + I_n + I_s - D \qquad (2)$$

où I_s = irrigation de surface.

L'erreur expérimentale théorique due à l'imprécision des différentes lectures est de ± 1 mm pour un bilan mensuel et légèrement inférieure pour un bilan décadaire, compte tenu de la moindre fréquence des relevés du pluviomètre. Une part importante de l'imprécision provient de I_s (± 0,5 mm). L'erreur serait donc de 0,5 mm dans la cas d'un calcul selon la formule (1).

Il ne nous a pas paru nécessaire d'augmenter la précision de lecture car nous ne pouvions envisager l'établissement de bilans journaliers ; les drainages sont trop étalés dans le temps (il faut plus d'un jour après l'arrosage de saturation pour que le drainage cesse) et d'autre part l'application d'irrigations journalières entraîne un piétinement exagéré du couvert.

La détermination de la précision réelle a été faite en première année d'essai ; les deux cuves dont nous disposions alors furent cultivées de la même façon pendant 6 mois. L'erreur probable sur les bilans décadaires et mensuels calculés à partir des écarts à la moyenne ne dépasse pas ± 4 mm.

Le dispositif comprenant au départ deux éléments de mesure fut complété à six évapotranspiromètres en 1958. Nous avons dressé, ci-dessous, le tableau de leur utilisation dans le temps :

Évapotranspiromètres	1956	1957	1958	1959	1960	1961
N° 1	Orge de printemps	Maïs	Blé de printemps	Betterave sucrière	Orge de printemps	Maïs (70 000 pieds/ha)
N° 2	Orge de printemps	Luzerne	Luzerne	Luzerne	Luzerne Moutarde	Maïs (50 000 p/ha) sol couvert d'une feuille polyéthylène.
N° 3	—	—	Dactyle	sol nu mise en place mélange fourrager	Prairie artificielle	Prairie artificielle
N° 4	—	—	Maïs	Blé d'hiver Moutarde	Maïs	Maïs (30 000 p/ha)
N° 5	—	—	Dactyle	id. n° 3	Prairie artificielle	Prairie artificielle
N° 6	—	—	Betterave sucrière	Maïs	Blé d'hiver	Maïs (50 000 p/ha)
Technique	Pas de saturation en fin de bilan				Saturation en fin de bilan	
Bilan	Mois	Mois	Mois	Mois	15-16 j ou 10 j	10-11 j
Précision	20 mm	20 mm	20 mm	20 mm	4 mm	4 mm
Diff. significative entre couverts	11 mm	11 mm	11 mm	11 mm	8 mm	8 mm

Le sol supportant les cultures est une Terre Noire très riche ; il a reçu néanmoins une fertilisation annuelle normale (100 P_2O_5— 100 K_2O — N selon la plante.)

Dans l'examen des résultats qui fait suite nous éviterons autant que possible la multiplication des données chiffrées. Le lecteur trouvera réunis, année par année, ces éléments dans l'annexe II.

D'autre part, nous parlerons fréquemment de l'évapotranspiration E T en opposition avec l'évapotranspiration potentielle E T P. Dans toute discussion E T caractérise cependant *une culture bien alimentée en eau.*

RÉSULTATS

Validité du concept d'évapotranspiration potentielle

La figure 2 donne une vue d'ensemble de la totalité des résultats mensuels au cours des six années d'essai. On peut dégager de cet examen deux notions essentielles :

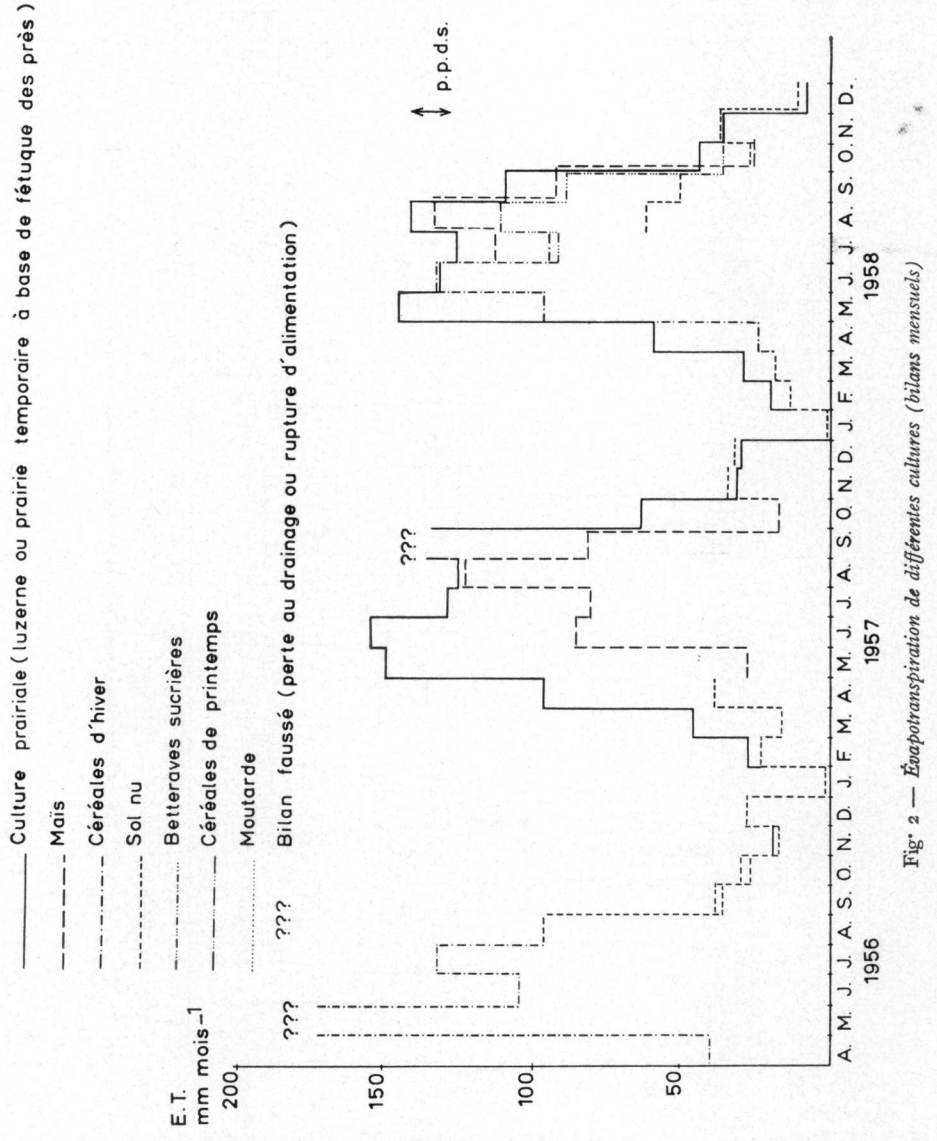


Fig. 2 — *Évapotranspiration de différentes cultures (bilans mensuels)*

1° *Courbe enveloppe.* Les cultures fourragères pérennes présentant un couvert dense et continu dans le temps fournissent chaque mois l'évapotranspiration maximum ; les autres cultures peuvent atteindre des consommations d'eau aussi élevées

que les précedentes, mais en une période réduite de leur existence, correspondant à leur maximum de développement pour une activité normale.

La courbe d'évapotranspiration, en fonction du temps, des couverts parfaits, constitue ainsi l'enveloppe de toutes les autres courbes. Ce fait capital justifie plei-

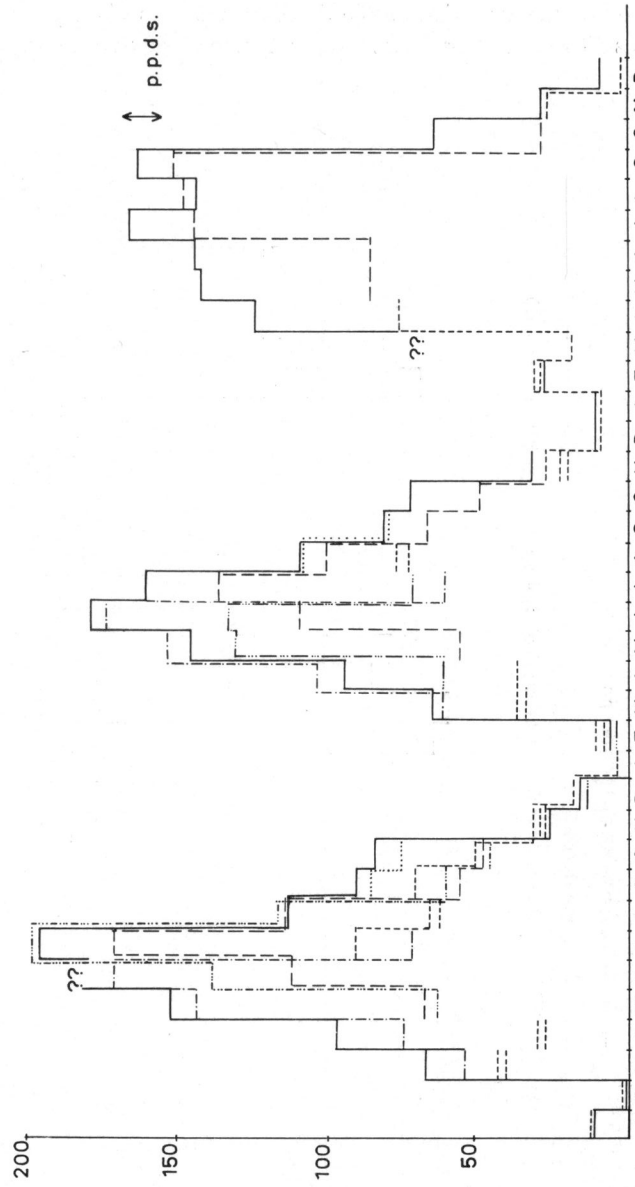


FIG. 2*. — *Évapotranspiration de différentes cultures (bilans mensuels)*

nement le concept d'évapotranspiration potentielle. Nous admettons que la courbe enveloppe est celle de ETP.

2° En corollaire : *coefficients de réduction*. Toute culture ne présentant pas en permanence les caractéristiques précédentes, en particulier les cultures annuelles,

peut *être parfaitement bien alimentée en eau tout en ayant une évapotranspiration réduite par rapport à la référence climatique ETP définie ci-dessus.*

THORNTHWAITE C. W. rapportant les calculs effectués par HALSTEAD montre que l'évaporation d'un sol mouillé est supérieure à l'ETP d'un couvert dense par le simple jeu d'un coefficient de réflexion (albedo) plus faible. Cette proposition est à retenir, mais semble dénuée de toute portée pratique. Il est certain que, dans notre dispositif, le plan d'eau est trop éloigné de la surface du sol pour y maintenir en permanence une humidité élevée ; il n'est pas moins certain cependant que cet état de fait est celui que l'on rencontre normalement dans la nature, y compris en zone humide ou irriguée ; nous remarquerons également que les arrosages fréquents pratiqués au cours des deux dernières années d'essai n'ont pas permis d'élever ET jusqu'au niveau de ETP, le déficit est toujours très notable. Il n'y a pas normalement compensation entre évaporation et transpiration.

Il apparaît donc que si le concept d'évapotranspiration potentielle correspond à un fait d'importance pratique, justifiant pleinement les multiples tentatives d'approche par le calcul, son application à l'irrigation nécessiterait en plus, et avec une importance égale, la considération de coefficients de réductions dont l'établissement s'avère à priori assez délicat.

II — PRÉCAUTIONS EXPÉRIMENTALES POUR LA DÉTERMINATION DE ETP

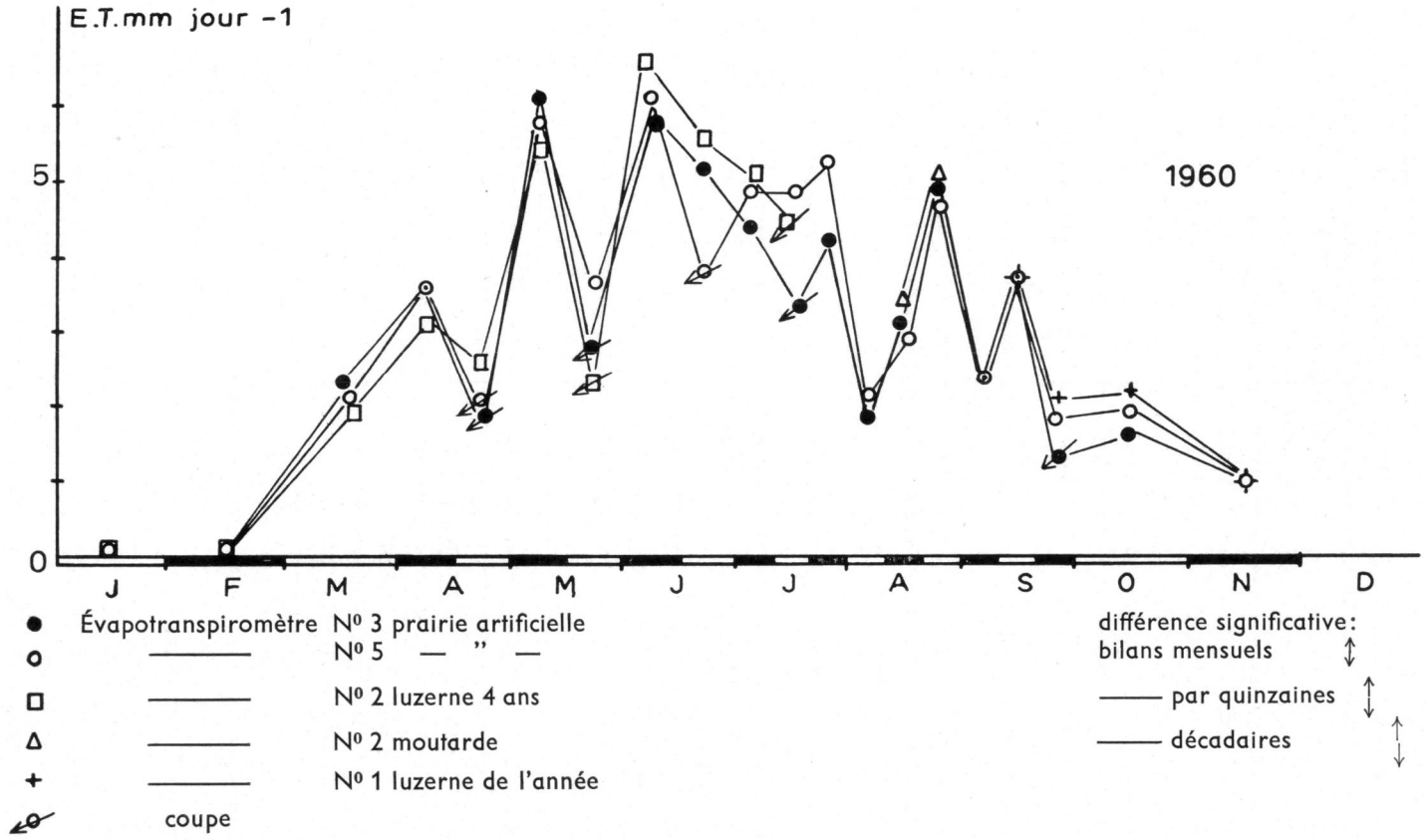
Nous ne reprendrons pas ici les discussions critiques sur l' « effet d'oasis ».

Nous admettons que chaque évapotranspiromètre est placé dans une ambiance microclimatique commune à tous avec possibilité d'apport advectif d'énergie ; la réalisation d'une ET limite « ETP » commune à tout couvert de densité suffisante montre que l'énergie tranférée latéralement est faible, ou tout au moins que son action est identique pour tous les végétaux, indépendamment de la « géométrie » de la plante.

La détermination de ETP demande une autre précaution, essentielle, sur laquelle les auteurs insistent peu : l'activité du végétal. Ce terme sous-entend évidemment, et c'est la première idée qui peut venir à l'esprit, l'effet dépressif de la fanaison du feuillage sur ET ; ceci est insuffisant.

Dans nos essais nous avons recherché ce couvert idéal, continu et « actif » de mars à décembre, avec différentes cultures, Luzerne du Puits, Dactyle ou prairie temporaire à base de Fétuque des prés. Le Dactyle perd très rapidement, sur un plan d'eau à faible profondeur, cette « activité » indispensable, manifestant une repousse très lente après les coupes et un jaunissement chronique, en même temps que le système radiculaire se localise dans les 4 ou 5 cm superficiels ; par contre, la prairie temporaire et la Luzerne (tout au moins pendant les 3 premières années) se comportèrent fort bien, avec cependant une tendance marquée de la première à s'enrichir en trèfle blanc ; leurs rendements à 15 p. 100 d'eau s'échelonnèrent de 15 à 20 tonnes /Ha pour la Luzerne et de 14 à 18 tonnes pour la prairie selon l'année, ce qui peut être considéré comme le fait de cultures en très bon état.

L' « activité » de ces couverts a connu cependant des périodes de réduction très nette au moment des coupes ; une grande partie des tissus végétaux qui sont alors mis à jour ont essentiellement un rôle conducteur et leur activité en tant que surface de transpiration est faible. On constate ainsi (figure 3) un effet dépressif sur la


E.T.mm jour -1
5
0
1960
J F M A M J J A S O N D
● Évapotranspiromètre N° 3 prairie artificielle
o —— N° 5 — " —
□ —— N° 2 luzerne 4 ans
Δ —— N° 2 moutarde
+ —— N° 1 luzerne de l'année
coupe
différence significative:
bilans mensuels
—— par quinzaines
—— décadaires

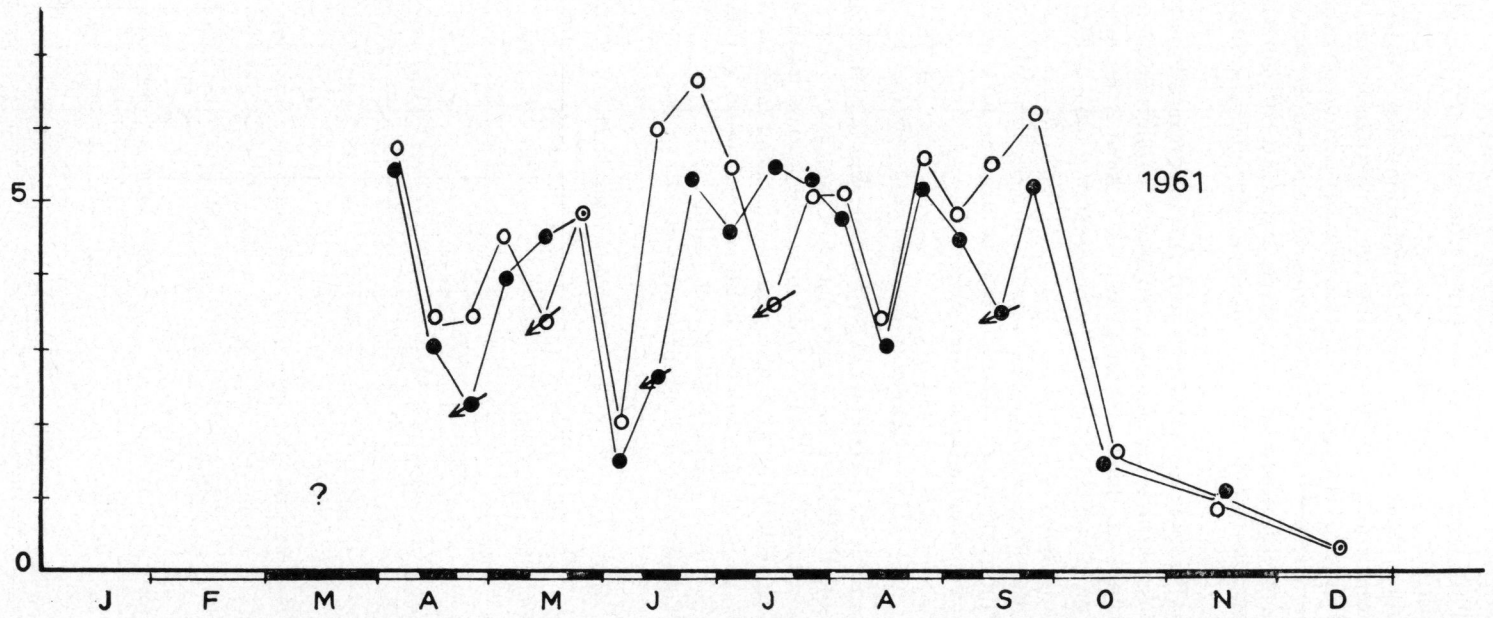


FIG. 3. — *Évapotranspiration moyenne journalière des cultures prises comme référenee pour ET potentielle — action dépressive des coupes*

consommation d'eau, sensible pendant une et parfois deux décades, et d'autant plus fort que l'ETP est elle-même plus élevée.

Ces interventions étant obligatoires, la détermination de l'ETP exige donc de la part de l'expérimentateur utilisant une culture prairiale, le contrôle d'au moins deux évapotranspiromètres sur lesquels les coupes seront effectuées alternativement. Lorsque l'on dispose d'un nombre restreint d'éléments de mesure, ce procédé est préférable au maintien de véritables répétitions. Le but peut être également atteint par un échelonnement de culture à croissance rapide, tels que mélanges légumineuses-céréales, moutarde blanche, etc.

La dispersion des résultats sur la figure 3 montre l'importance d'une telle précaution

Nous pouvons constater par ailleurs, en éliminant les effets de coupe, que l'accord est satisfaisant entre les différentes mesures ; en particulier les données obtenues avec la Luzerne ou la moutarde blanche (août-septembre 1960) confirment les résultats de la paririe temporaire.

Le principe précédent est appliqué à partir de 1960, la courbe enveloppe de la figure 2 et les chiffres portés en annexe II sous la rubrique ETP correspondent aux ET maxima relevées sous cultures fourragères.

III — Coefficients de réduction

S'il est assez facile de déterminer expérimentalement la période durant laquelle une culture atteint ETP dans sa consommation d'eau, par contre l'établissement de coefficients de réduction [ET/ETP × 100] applicable pendant les autres phases de la végétation ne peut se faire qu'avec une grande prudence ; pour un stade de développement donné, ils varieront selon les conditions climatiques, et cela d'autant plus que la participation de la plante à ET est plus faible.

Nous nous bornerons pour l'instant à rapporter des faits.

	Rapport $\frac{\text{E T Maïs}}{\text{E T P}} \times 100$ (= 100 qd la différence ET-ETP $\leqslant$ 10 mm)													
	Janv.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	Période de végétation	Année
1957 60 000 p/ha INRA 244.	100	100	29	40	18	56	63	100	—	32	100	100	—	—
1958 60 000 p/ha INRA 244.	—	—	—	—	—	—	89	100	85	58	100	100	—	—
1959 60 000 p/ha INRA 244.	100	100	64	30	44	62	88	100	63	58	100	100	78	71
1960 60 000 p/ha W. 355 ..	100	100	54	39	38	61	85	100	83	68	100	100	70	76
1961 70 000 p/ha INRA 258.	100	100	—	58	58	57	83	100	88	58	100	100	71	—
coef. moyen	100	100	51	43	40	61	82	100	81	55	100	100	68	67,5
Observ.	← Sol nu →			Semis ←			Fl. ♂			→ Réc. ←	Sol nu →			

1. — *Maïs.*

Cette culture fut suivie chaque année et nous fournit un bon exemple de fluctuation de ET/ETP au cours du développement et d'une année à l'autre.

Les variétés de maïs précoces utilisées atteignent systématiquement le régime d'ETP en août. Cette observation peut être précisée par les bilans décadaires effec-

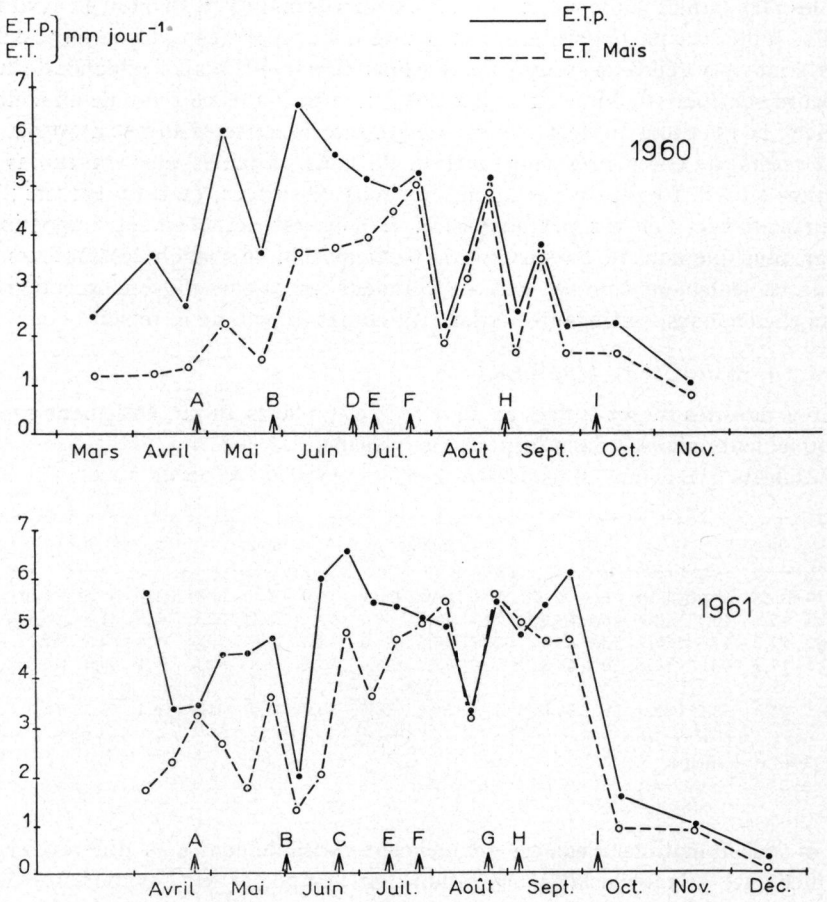


FIG. 4. — ET *du Maïs comparés à* ETP *(cultures prairiales)*

A — Semis
B — 3e feuille
C — 9e feuille
D — 13e feuille
E — épiaison
F — floraison
G — maturité laiteuse
H — grain pâteux
I — fané

tués en 1960 et 1961 (figure 4) montrant que la période de réalisation de ETP s'étend de la floraison au stade « grain pâteux » soit, dans notre région, du 20 juillet au 15 septembre. L'élément le plus important apparaissant quand ETP s'établit, est un changement de distribution des surfaces foliaires à l'extrémité supérieure de la plante ; du dégagement de la panicule mâle jusqu'au milieu de la floraison se produit

un allongement rapide des derniers entre-nœuds et les 4 ou 5 feuilles supérieures, jusqu'alors serrées les unes contre les autres et plus ou moins dressées, s'écartent et se développent plus librement.

Durant les 4 mois d'hiver, lorsque ETP est très basse, la pluie est suffisante et le sol nu se comporte comme une surface parfaitement couverte. En mars, avril, mai, l'ETP s'élève rapidement (59, 103 et 148 mm en moyenne respectivement), le rapport ET/ETP passe par un minima, les valeurs les plus basses correspondant aux pluies les plus faibles (14 mm 9 et 23,5mm en mars et mai 1957, 30,9mm en avril 1959). En juin, juillet, la participation de la plante à l'évapotranspiration augmente, les rapports moyens s'élèvent et leurs fluctuations diminuent, mais l'influence de la pluie est encore sensible (16,6mm en juillet 1957) ; cette influence s'annule en août, puis intervient la fanaison, parfois très rapide (récolte le 22 septembre en 1959)

Les résultats enregistrés sont fonction de trois variables plus ou moins indépendantes : ETP, fréquence des humidifications de surface, état du couvert ; l'analyse quantitative n'en est pas simplifiée. Il nous est actuellement impossible de préciser, plus que nous ne l'avons fait, la participation de chacun des facteurs ;nous retiendrons seulement comme ordre de grandeur les valeurs moyennes enregistrées, valeurs elles-mêmes contingentes et liées au climat moyen de la région.

Influence de la densité du peuplement

Trois densités furent testées en 1961 : 3,5 et 7 plants au m², étalement couvrant les peuplements réalisés dans la pratique agricole.

Résultats : ET mm Maïs INRA 258 (25 Avril-9 Octobre)

	mai			juin			juillet			août			septembre			octobre	total
Maïs	1-10	10-20	20-31	1-10	10-20	20-30	1-10	10-20	20-31	1-10	10-30	20-31	1-10	10-20	20-30		
3 *p*/m² ..	27,9	15,5	40,6	12,9	16,9	43,3(*)	29,7	41,4	44,3	49,9	28,1	52,8	37,9	31,3	40,1	31,8	544,4
5 *p*/m² ..	28,2	17,7	43,8	15,5	18,6	38,4	30,7	46,8	48,5	48,5	31,0	55,3	43,8	39,5	42,1	24,8	573,2
7 *p*/m² ..	26,9	17,4	38,8	13,3	20,2	48,8(*)	36,2	47,0	55,4	55,1	31,8	62,5	51,1	46,9	47,3	28,4	627,7
E T Pmm (prairie).	45,2	45,0	53,2	20,2	59,3	65,6(*)	55,6	54,4	56,8	50,6	33,2	61,5	48,4	54,7	61,3	48,0	813,0

(*) légère perte au drainage.

Les consommations d'eau ne commencent véritablement à se différencier qu'au 1er juillet date à laquelle la transpiration doit l'emporter sur l'évaporation directe. L'indice foliaire (1) pour 7 plantes au m² se situe alors aux environs de 2 (figure 5) ; il plafonne à 6,0, valeur pour laquelle l'ETP est atteinte ; on ne doit pourtant pas considérer cet indice foliaire comme valeur remarquable car les densités inférieures dont les indices maximaux ne dépassent pas 3,0 et 4,3, évaporent des quantités d'eau sensiblement égales à l'ETP ; il est vrai cependant que cette valeur limite est atteinte un peu plus tardivement et se maintient pendant une durée plus courte.

Les différences d'évapotranspiration entre les couverts sont généralement faibles et nous ne pouvons prendre conscience de leur signification que par leurs répétitions systématiques dans le temps. Ainsi sur un cycle complet de végétation nous

(1) Indice foliaire = surface foliaire avec les 2 faces comprises, par unité de surface de sol.

relevons un déficit global de 83 mm entre les ET des densités extrêmes, soit 14 p. 100 de l'évapotranspiration moyenne, ce qui paraît évidemment très peu si l'on se rappelle que la densité passe de 3 à 7.

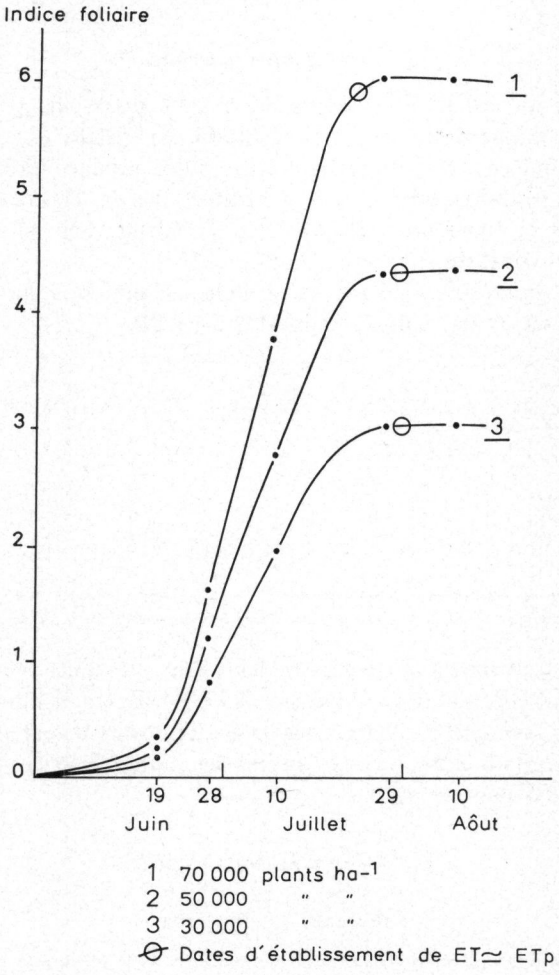


FIG. 5. — *Variation de l'indice foliaire du Maïs* INRA 258 *au cours de son développement* (1961)

Comme les rendements obtenus sont presque proportionnels au peuplement, on conçoit que la meilleur rentabilisation de l'eau exige de fortes densités.

Peuplement	Consommation globale 3m² (litres)	Mat. sèche Totale (kg)	Grains secs à 105° (kg)	Eau évaporée par kg de Mat. sèche (litres)
3 plants/m².....	1630	2,66	1,32	613
5 plants/m².....	1720	3,60	1,92	478
7 plants/m².....	1885	5,17	2,50	364

Les phénomènes de compensation que nous sommes obligés d'admettre ici invoquent une augmentation de l'évaporation directe du sol et, surtout lorsque la plante est bien développée, un accroissement de la transpiration par unité de surface foliaire pour les faibles densités, d'où un risque de sécheresse physiologique accusé lors des journées très chaudes.

2. — *Betterave sucrière*

Sur les deux années d'observations dont nous disposons pour cette culture, nous retiendrons uniquement 1959 ; les résultats enregistrés en 1958 n'ont pas de signification pratique car cette première culture, mise en place immédiatement après l'installation de l'évapotranspiromètre, a souffert dès le départ d'une préparation du sol défectueux et son rendement final (10 T./Ha de racines) reflète le mauvais état de végétation constaté sur tout le cycle.

Avec une information aussi restreinte nous ne pouvons qu'être fort réservé quant à l'interprétation des chiffres rapportés à l'ETP.

Période d'observation	Janv.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	Période de végétation	Année
1959 densité 75 000 p/ha ..	100	100	63	28	41	77	100	100	68	55	100	100	177	73
	←— sol nu —→			semis	←— démariage —→						récolte			

Ces résultats sont tout à fait comparables à ceux que nous avons rapportés pour la maïs ; il apparaît cependant que le régime d'ETP est atteint plus tôt, dès le début du mois de juillet ; ceci est d'ailleurs conforme aux observations que l'on peut faire sur l'état des couverts à cette date ; le 25 juin les indices foliaires sont de 2,36 pour la betterave et 1,60 pour le maïs.

3. — *Blé d'hiver* (*Cappelle*).

Résultats : $\frac{ET}{ETP} \times 100$

	Janv.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Période de végétation	Année
1959	100	100	81	76	100	100	37	37	—	—	—	—	75	—
1960	100	100	100	100	100	100	39	68	68	65	100	100	85	80
Observations	quelques feuil.	— tallage —		montaison	— fl. —		récolte —		sol	nu —				

Dès la sortie de l'hiver le blé présente un couvert suffisant pour atteindre l'évapotranspiration potentielle ou presque ; ce régime se maintient jusqu'au début de la fanaison où nous assistons à une chute brutale de ET.

4. — *Céréales de printemps.*

Résultats : $\frac{ET}{ETP} \times 100$

	Janv.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Période de végétation	Année
1958 Blé d'avril...	100	100	66	41	66	100	75	44	48	65	100	100	75	67
Observations ..	sol	nu	— 21 semis		19 au 10 montaison		10-30 fanaison		—	—	—	—	—	
1960 Orge Rika	100	100	59	65	90	74	43	71	—	—	—	—	70	—
Observations ..	sol	nu	1er semis		5-30 montaison		17 au 7 fanaison							

L'ETP s'établit un peu après le début de la montaison et se maintient jusqu'aux premiers signes de fanaison.

***

En conclusion, l'évapotranspiration potentielle considérée comme grandeur climatique définissant l'évapotranspiration maximum de toute couverture végétale, est une conception exacte se vérifiant expérimentalement.

C'est-à-dire que, pour un pouvoir évaporant donné, toute surface cultivée, bien alimentée en eau, présente une ET inférieure ou égale à ETP ; celle-ci se réalisant pour un état de végétation idéal assez bien caractérisable pour chaque culture. Les facteurs de réalisation ou non-réalisation semblent être essentiellement liés à l'importance et à la répartition de la surface foliaire fonctionnelle ; en des stades physiologiques particuliers, tels que « montaison » ou « floraison » des céréales, il n'est pas possible de déceler de modifications remarquables de l'évapotranspiration ; si de tels phénomènes existent, ils sont d'importance minime et ne permettent pas d'infirmer l'hypothèse ETP.

La possibilité d'une transpiration limite au-delà de laquelle le végétal ne pourrait plus suivre le rythme imposé par les conditions extérieures, soulève un problème important que nous ne pouvons pas aborder avec les éléments dont nous disposons. Notons cependant que ce débit critique devrait être très élevé car on peut observer des évapotranspirations potentielles de l'ordre de 6,5mm par jour, TURC L. signale 8 mm en Irak, ces valeurs correspondent à des moyennes mensuelles nous laissent supposer des ET instantanées beaucoup plus élevées.

Pour notre part, nous considérons que nous nous décelé expérimentalement la valeur ETP lorsque pour différences couverts nous obtenons simultanément des ET identiques ; par extension, nous admettons, le concept étant vérifié par ces premiers résultats, que ETP est fournie dans les autres périodes par la culture couvrant parfaitement le sol.

Nous disposons ainsi de la courbe représentative du maximum possible des consommations d'eau au cours du temps.

Cette donnée n'est malheureusement pas transposable directement à chaque instant pour tous les couverts végétaux.

IV. Évapotranspiration mesurée et calculée

A deux constatations expérimentales majeures précedemment exposées correspondent deux objectifs distincts dans les études des rapports entre climat et besoin en eau :

A. — Détermination d'une grandeur de référence dite *évapotranspiration potentielle*, possédant en valeur absolue une équivalence purement climatique, intransposable à la pratique sans étude complémentaire.

B. — Établissement d'une corrélation permettant l'estimation approchée de consommations réelles moyennes, avec sur ou sous-estimation selon le cas d'espèce, mais un risque limité de graves erreurs.

Nous examinerons dans quelle mesure certaines des différentes formules proposées pour le calcul de l'évapotranspiration satisfont à l'une ou l'autre de ces propositions.

A. — Évaluation de l'évapotranspiration potentielle

Dans le tableau ci-dessous sont réunies les moyennes mensuelles sur 5 années des ETP mesurées — telles que nous les avons définies dans le précédent chapitre — et les valeurs correspondantes calculées par les formules de Penman (I), Bouchet (II), Turc (III), Thornthwaite (IV), Makkink (V), Blaney-Criddle (VI), et Hargreaves (VII) (voir annexe III pour l'expression des formules).

Évapotranspiration potentielle mesurée et calculée (mm), valeurs moyennes de 1957 à 1961

	Janv.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Avr. à oct. inclus	Année
Mesurée	4,8	16,4	50,1	94,2	147,4	157,8	155,8	123,8	110,7	62,0	30,6	14,8	851,7	968,4
I														
Penman ETP	13,4	26,4	48,7	67,5	105,3	110,2	121,1	106,1	65,7	36,3	13,3	11,3	612,2	725,3
Penman Eo	22,3	44,0	69,7	96,4	132,0	138,1	153,9	133,0	93,9	51,9	22,9	18,9	799,2	977,0
II														
Bouchet	—	—	—	103	127	136	162	135	107	67	—	—	840	—
III														
Turc	10,1	28,2	45,4	62,9	94,4	108,1	115,5	104,5	78,3	46,9	18,4	10,0	610,6	722,7
IV														
Thornthwaite	7,6	22,4	37,4	48,6	73,5	106,8	120,9	111,8	83,0	49,2	20,2	9,6	593,7	691,0
V														
Makkink	11,3	23,8	41,8	55,6	82,2	88,0	96,7	86,5	61,0	36,6	12,2	8,6	506,6	604,3
VI														
Blaney-Criddle														
K = 1	60	74	99	116	151	169	180	163	137	103	71	85	1 019	1 381
K = 0,8	48	59	79	93	121	135	144	130	110	82	57	64	815	1 004
VII														
Hargreaves														
K = 1	13,4	45,5	70,6	91,0	163,6	198,0	223,8	223,0	145,1	86,0	26,0	15,0	1 132,5	1 301,0

I, III, IV aboutissent à des résultats voisins, déficitaires d'environ 30 p. 100 par rapport aux valeurs mesurées. Le déficit atteint 40 p. 100 avec la formule V. Nous remarquons que l'évaporation théorique d'une nappe libre (Eo de PENMAN) serait une évaluation acceptable de l'ETP réelle dans nos conditions expérimentales.

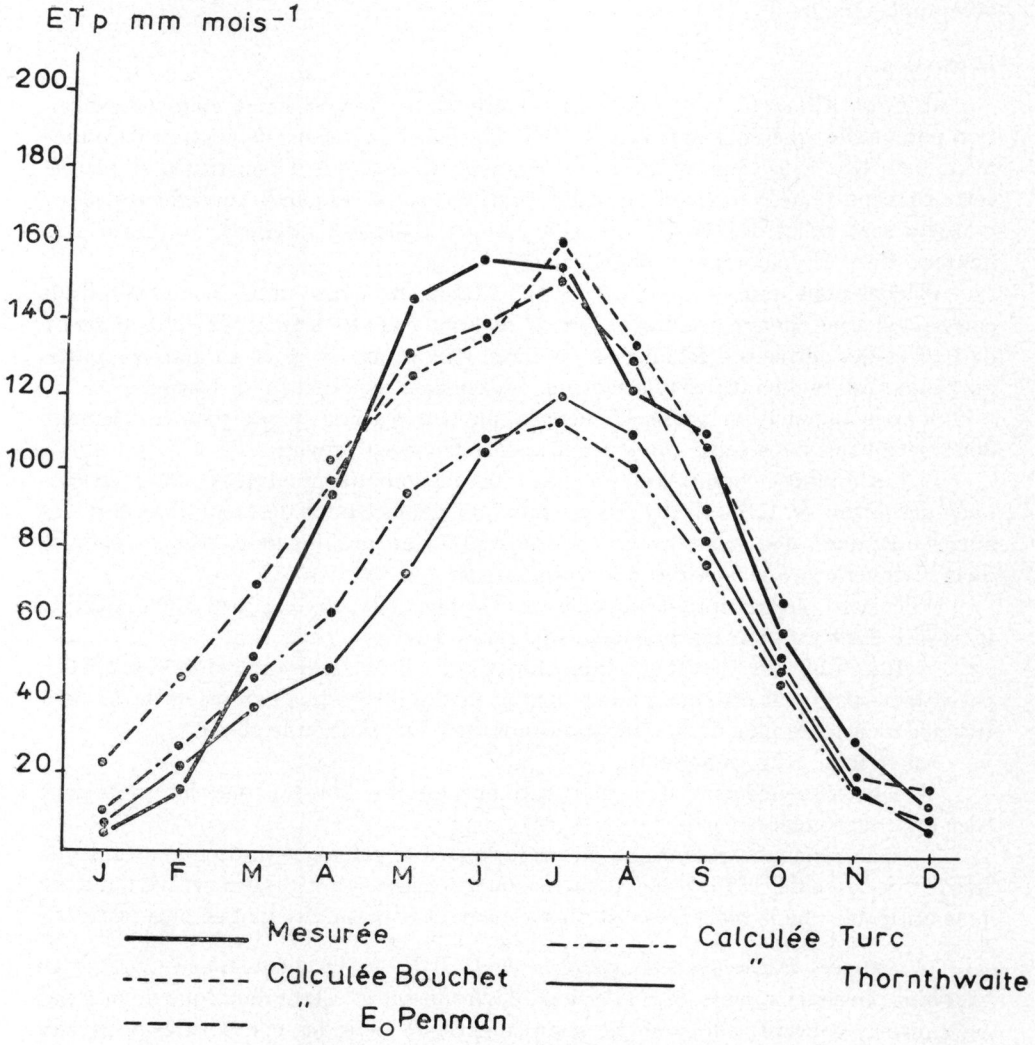


FIG. 6. — ETP *mensuelles moyennes (5 années)*

En ce qui concerne la formule VI, BLANEY et CRIDDLE n'ont pas envisagé son utilisation sans l'application de coefficients réducteurs (K) variables d'ailleurs avec la culture ; effectivement elle nous fournit, prise brutalement, des chiffres excessivement élevés ; l'utilisation du coefficient 0,8 proposé pour la Luzerne permet de retrouver des valeurs moyennes proches de la réalité avec cependant surestimation en période froide et sous-estimation au printemps.

Il en va de même pour la proposition de HARGREAVES, mais ici l'étonnante variabilité des coefficients K présentés par l'auteur (1) pour les cultures pérennes prouve qu'il s'inscrit en faux contre le concept ETP ; il est donc vain de vouloir trouver dans la formule ce que l'auteur n'y a pas mis.

Le calcul, selon BOUCHET, nous conduit à des valeurs moyennes tout à fait acceptables (figure 6).

Discussion.

a) *Bilan d'énergie.* — Si l'on peut concevoir *in abstracto* une évapotranspiration potentielle, que nous appellerons ETP′ correspondant sensiblement au rayonnement net R*n* (2), lorsque la surface d'échange est idéalement constituée et placée, cette conception ne peut avoir de réalité pratique que si les conditions effectivement réalisées sont celles de l'hypothèse, soit lorsque ETP′ est inférieure ou égale à la hauteur d'eau H disponible naturellement.

Plaçons-nous dans le cas ETP′ > H ; au déficit d'évapotranspiration résultant correspond une énergie résiduelle qui se répartit essentiellement en échauffement de l'air et des surfaces d'échange. L'équilibre climatique est donc caractérisé, entre autres par des températures plus élevées, des tensions de vapeur plus basses.

Si nous augmentons artificiellement la quantité d'eau disponible sur un élément de surface placé dans cette ambiance, deux effets sont à prévoir :

1° Les données climatiques préexistantes ne sont pas modifiées : dans ce cas, l'augmentation de ET n'ayant pas entraîné un déplacement de l'équilibre dans les autres domaines, nous pouvons être certains qu'il s'est produit un transfert d'énergie de la périphérie vers la zone d'évaporation intense.

ETP′ n'est plus acceptable puisque son calcul ne tient pas compte de toute l'énergie incidente. ETP est alors normalement supérieure à ETP′.

2° Il s'établit un nouvel équilibre climatique : ETP réelle tend alors vers ETP′ ; ces valeurs pourront être considérées comme égales lorsqu'une extension de la zone irriguée n'entraîne plus de modifications notables sur ETP ou le climat.

En résumé ETP′ représente :

— Une référence climatique et « pratique » exacte, dans les zones naturellement bien approvisionnées en eau,

— Une référence climatique théorique est une référence pratique en tant que limite inférieure de l'ETP réelle, dans les zones sèches ; son utilisation étant d'autant plus criticable que la sécheresse est plus accusée et le périmètre irrigué plus restreint.

b) *Données météorologiques et calcul de E T P.* — On peut ainsi envisager en un point plusieurs valeurs de ETP selon l'environnement. Cette remarque ne met pas en cause le concept, elle souligne simplement que pour les couvertures végétales situées au point considéré, ETP est fonction du micro-climat réel. Les données expérimentales sont donc tout à fait contingentes et difficilement extrapolables.

(1) K varie de 0,41 à 0,74 pour la Luzerne en végétation active ; d'autre part, K = 0,24 pour une prairie.

(2) cf. BOUCHET R. J., 1961. $Rn = Rg(1-a) + Ra-\sigma T^4 \simeq ETP'$,

Rg = rayonnement global,

Ra = rayonnement atmosphérique,

$a = \frac{\text{rayonnement réfléchi}}{Rg}$

σT^4 = rayonnement de la Terre (T ≃ température absolue de l'air).

La réalisation de ETP = ETP′ constitue elle-même un cas d'espèce lié à des conditions particulières dont nous ne pouvons que difficilement apprécier l'existence.

ETP doit donc être caractérisée dans son contexte et la méthode idéale doit permettre une évaluation correcte dans toutes les conditions.

Parmi les diverses méthodes examinées, celle de BOUCHET basée essentiellement sur les données de l'évaporomètre de Piche sous abri fournit les résultats les plus conformes aux données expérimentales. On peut admettre que l'évaporation de la surface de référence intègre bien à son niveau les facteurs principaux de l'évapora-

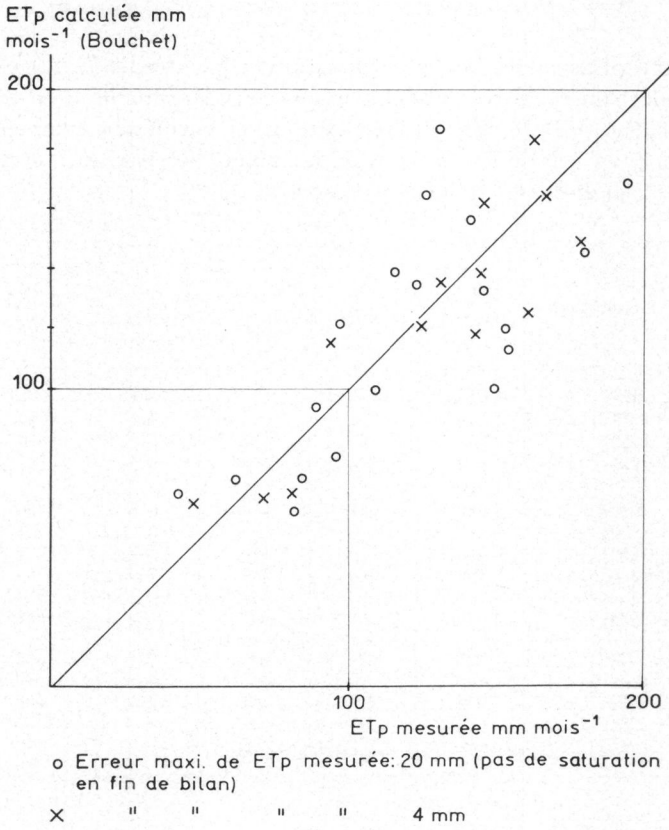


FIG. 7.

tion du couvert végétal, en particulier elle est sensible à *toute* l'énergie disponible y compris, comme c'est peut-être le cas ici, aux apports par advection.

La méthode, à cause même de sa sensibilité, exige que les données de base soient recueillies dans les conditions d'applications, c'est-à-dire sur une parcelle en régime d'Évapotranspiration potentielle.

Une partie des écarts relevés entre les valeurs individuelles de ETP mensuelles mesurées et calculées (figure 7) provient sans doute d'une telle source d'erreur ; en plaçant un évaporomètre Piche au centre de la surface de contrôle nous avons pu effectivement obtenir, en 1961, des valeurs calculées légèrement supérieures à celles que l'on pouvait tirer de l'évaporomètre du parc météorologique situé à 40 m.

ETP mm	10 au 21 mai	Juin	Juil.	Août	Septemb.	Octob.
Mesurée	98,4	145	167	145	164	48
Calculée (parc météo)	75,5	139	164	138	183	62
Calculée (Piche sur cuve).....	84	146	171	145	176	60

B. — *Estimation des consommations réelles moyennes*

L'évapotranspiration réelle des cultures annuelles atteint l'ETP pendant une fraction seulement du cycle végétatif. La simple considération de ETP et par conséquent les formules qui en permettent l'évaluation entraînent une surestimation des besoins globaux saisonniers ET ; selon les plantes et l'année, l'erreur pourrait atteindre 150 à 250 mm (voir tableau ci-dessous).

Culture	Campagne	ETP mesurée	ET mesurée	ET calculée			
				TURC	THORNTHWAITE	BLANEY-CRIDDLE	HARGREAVES
Maïs.....	1957.....	765 (*)	417	542	532	667	262
	1959.....	734	573	518	515	612	238
	1960.....	747	520	508	530	660	271
	1961.....	812	573	553	534	685	226
	Moyenne ...	765	521	530	528	656	
Blé d'hiver....	1959.....	706	528	496	503	648	378
	1960.....	652	563	447	420	635	411
Blé de printemps	1958.....	490	366	419	369	523	317
Orge de printemps	1960	538	376	352	322	538	392
Betterave sucrière	1959.....	818	626	568	565	600	366

(*) Résultat incertain (mauvais fonctionnement en septembre).

Par contre les ET calculées selon les formules de TURC et de THORNTHWAITE montrent un accord dans l'ensemble satisfaisant avec les bilans saisonniers. L'exemple du maïs présenté figure 8 souligne que cet accord résulte de compensation entre surestimation et sous-estimation. Ces fluctuations sont des plus logiques. Après ce que nous avons exposé, il n'est pas nécessaire de faire intervenir la notion de consommation de pointe liée au stade physiologique pour expliquer des valeurs calculées déficitaires.

Les divergences risquent d'être d'autant plus importantes que la culture testée maintient le régime d'ETP plus longtemps ; déjà notable pour le blé d'hiver et la betterave sucrière, la sous-estimation serait très forte pour les cultures prairiales définissant à chaque instant l'évapotranspiration potentielle aux effets de coupe près.

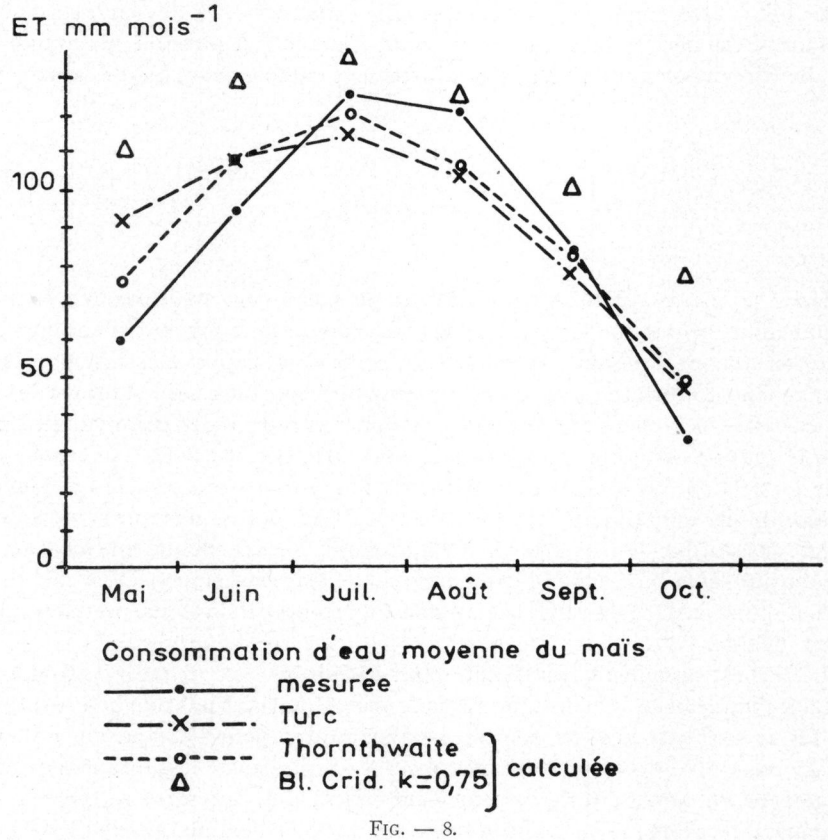


FIG. — 8.

Nous avons noté pour mémoire les données obtenues avec les formules de BLANEY CRIDDLE et HARGREAVES, les chiffres ont été calculés avec les coefficients «plante» saisonnièrs indiqués par les auteurs ; ces coefficients sont dans un cas trop forts et dans l'autre extrêmement faibles ; l'ajustement aux valeurs mesurées nécessiterait les coefficients saisonniers suivants :

	Maïs	Blé d'hiver	Céréales de printemps	Betterave sucrière
BLANEY-GRIDDLE.....	0,60	0,54	0,52	0,68
HARGREAVES.....	0,55	0,68	0,50	0,62

Nous n'attachons aucune valeur particulière à ces chiffres, tant il nous paraît inutile de rechercher des coefficients spécifiques dans le simple but de faire coïncider la réalité avec une formule dont la correspondance climatique n'est pas définie. Il est préférable, dans l'état actuel des choses, d'utiliser pour l'estimation des ET réelles les ajustements statistiques satisfaisant le plus grand nombre de cas, mais ne prétendant pas à une précision illusoire.

Lorsque nous disposerons d'une méthode de calcul de ETP précise et assez

souple pour être appliquée à toute échelle climatique, il deviendra possible et nécessaire d'étudier les facteurs déterminant l'évapotranspiration maximum réelle pour aboutir, en partant de ETP, à un ajustement valable pour chaque cas concret.

CONCLUSIONS

Dans le travail précédent nous avons pu mettre en évidence une évapotranpiration limite commune à tous les végétaux présentant un état d'activité et une densité de couvert suffisant ; la validité du concept d'évapotranspiration potentielle se trouve ainsi confirmée ; mais en même temps, compte tenu des conditions de réalisation des essais, nous percevons que l'on ne doit pas restreindre cette validité au seul cas où le couvert est infini et les effets de bord nuls. Ceci est heureux puisque le propre de l'irrigation, domaine d'utilisation pratique du concept, est de créer une zone de discontinuité climatique. L'appréciation de l'ETP doit donc tenir compte de toute l'énergie susceptible de participer à l'évaporation ; ceci complique une solution théorique du problème basé sur le bilan énergétique. La prise en considération de l'évaporation d'une surface de référence semble apporter cependant une première approximation valable.

L'ETP est nettement insuffisante pour définir les besoins réels de tout couvert végétal à chaque instant ; certaines formules ne permettant pas une bonne estimation de ETP se sont par ailleurs montrées satisfaisantes pour l'estimation des besoins réels globaux ; la détermination des évapotranspirations instantanées propres à chaque type de couvert reste un problème délicat qui ne pourra se résoudre sur le plan général que lorsque nous aurons un moyen précis d'estimation de l'ETP réelle.

Reçu pour publication en mai 1962.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BLANEY, CRIDDLE, 1952. *Proc. Amer. Soc. Civil Eng.*, **117.**

BOUCHET R. J., 1960. Evapotranspiration Potentielle d'un couvert : sa signification et sa mesure à partir de l'évaporation sous abri. *C. R. Acad., Sci.*, **12,** 1231.

BOUCHET R. J., 1960. Evapotranspiration potentielle et évaporation sous abri. *VIe Journées de l'Hydraulique (Nancy)*, II, rapport n°2.

BOUCHET R. J., 1961. Signification et portée agronomique de l'Évapotranspiration Potentielle. *Ann. agron.*, **12,** 51-63.

HARGREAVES G. H., 1956. Irrigation requirements based on climatic data. *Proc. Amer. Soc. Civil Eng.*, **1105.**

PENMAN H. L., 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. Roy. Soc.*, A, **193.**

THORNTHWAITE C. W., 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geog. Rev.*, 55-94.

THORNTHWAITE C. W., 1954. A re-examination of the concept and measurement of Potential evapotranspiration. *Publications in Climatology*, **7,** 1, 200.

TURC L., 1961. Évaluation de besoins en eau d'irrigation. Évapotranspiration Potentielle. *Ann. agron.*, **12,** 13-49.

SUMMARY

REAL EVAPO TRANSPIRATION OF VEGETAL COVERS WELL-PROVIDEED WITH WATER, AND POTENTIAL EVAPO-TRANSPIRATION. EXPERIMENTAL DETERMINATION

Six-year results of measurements with THORNTHWAITE'S evapotranspiration meters are reported, comparing values obtained on different agricultural crops (grassland, maize, sugar beet, cereals).

The validity of the concept of potential evapo-transpiration is confirmed, inasmuch as there exists a limit value of evapo-transpiration common with all covers; however, each crop possesses a potential evapo-transpiration for a limited growth period only.

Values of evapo-transpiration calculated by formulae of PENMAN, TURC, BOUCHET, THORNTHWAITE, MAKKINK, BLANEY-CRIDDLE and HARGREAVES are compared with experimental data.

ZUSAMMENFASSUNG

DIE WIRKLICHE EVAPOTRANSPIRATION VERSCHIEDENER, MIT WASSER GUT VERSORGTER PFLANZENDECKEN UND DIE POTENTIELLE EVAPOTRANSPIRATION EXPERIMENTALE BESTIMMUNG

Der Verfaser erwähnt das Ergebnis sechsjähriger Messungen mit dem Evapotranspirationsmeter von THORNTHWAITE. Er vergleicht die Bestimmungswerte für verschiedene Kulturpflanzen (Wiese, Mais, Zuckerrübe, Getreide).

Die Gültigkeit des Konzepts der potentiellen Evapotranspiration ist durch das Bestehen eines Grenzwertes, der allen Pflanzendecken gemein ist, genügend gewahrleistet. Jedoch befindet sich jede Kultur nur für eine begrenzte Vegetationsdauer in der potentiellen Evapotranspiration.

Die nach den Formeln von PENMAN, TURC, BOUCHET, THORNTHWAITE, MAKKING, BLANEY-CRIDDLE und HARGREAVES errechneten Evapotranspirationen werden den Experimentalwerten gegenübergestellt.

Отношение реальной эвапотранспирации различных растительных покровов хорошо снабженных влагой к эвапотранспирации потенциальной. Экспериментальное определение.

М. РОБЕЛЕН (Клермон-Ферран).

Автор делится результатами измерений полученныхим в течении 6-ти лет при помощи эвапотранспирометра Торнтуайта. Далее он сравнивает между собой определенные величины полученные им после опытов проделанных с различными растениями употребляющимися в полеводстве (луговые культуры, кукуруза, сахарная свекла, злаки).

Законность концепта потенциальной эвапотранспирации подтверждена в том смысле, что существует общая всем растительным покровам предельная величина эвапотранспирации; длительность режима потенциальной эвапотранспирации каждой культуры ограничена однако только одним определенным вегетационным периодом.

Экспериментационные данные автора сравниваются затем с эвапотранспирациями исчисленными по формуле Пенмана, Тюрка, Бушэ, Торнтуайта, Маккинка, Бланнэй-Гриддля и Хэргривса.

ANNEXE I

Site du point d'observation

longitude : 0°,46′ E., latitude : 45°46′ N., altitude : 350 m.
figure : 1. Échelle 1/100 000
figure : 2. Échelle : 1/6 000.

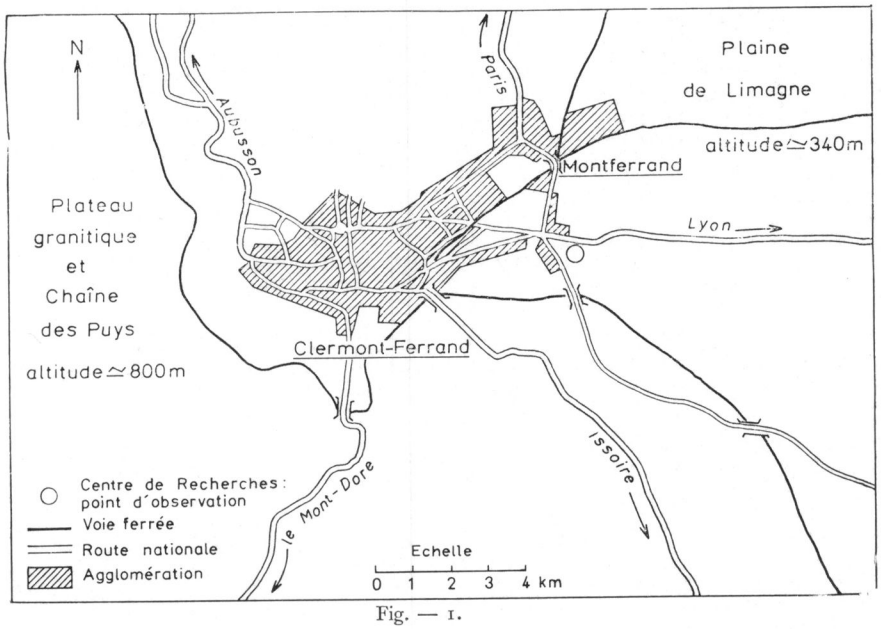
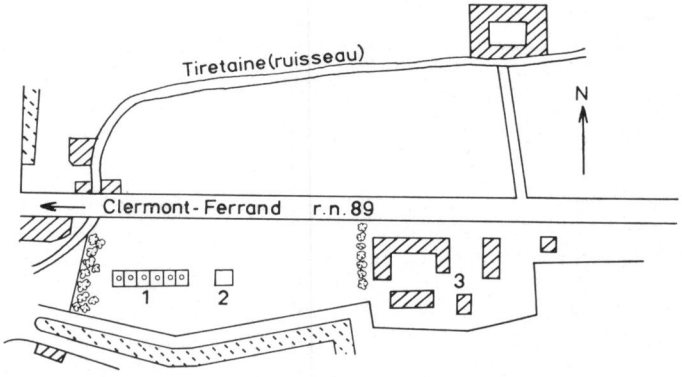


Fig. — 1.



1 Batterie d'Evapotranspiromètres
2 Parc météorologique
3 Bâtiments du centre de recherches agronomiques
Surface bâtie

Fig. 2.

ANNEXE II

Données météorologiques. Évapotranspirations mesurées et calculées. Résultats année par année

Températures - Hygrométrie - Évaporomètre Piche : relevés sous-abri anglais à 2 m du sol,
Héliographe de Campbell,
Pluviomètre association,
La vitesse du vent à 20 m nous a été fournie par le Camp d'Aviation d'Aulnat situé à 3 km de notre point d'observation.
La radiation globale Ig (cal. cm^{-2} jour $^{-1}$) est calculée par la fomule proposée par Turc 1961).

$$Ig = Ig_A (0{,}18 + 0{,}62\ S/So)$$

Ig_A = Rayonnement solaire en l'absence d'atmosphère.
S/So = insolation relative

Évapotranspiration (en mm)

a) *Mesurée* ; *ETP* = valeur mensuelle maxima relevée sous culture fourragère :
1° 1957-58-59. Luzerne. Les effets de coupe ne sont pas exclus. Les valeurs sont donc entachées d'une erreur par défaut certain mois.
2° 1960-61 — Prairie temporaire (Fétuque des prés 60 p. 100, Pâturin des prés + Ray-Grass anglais 30 p. 100, Trèfle blanc 10 p. 100). Effets de coupe exclus.
ET = évaporation de diverses cultures annuelles.
Dans les tableaux annuels, les valeurs observées pendant la période de végétation sont incrites en caractère normaux, les valeurs observées en dehors de ces périodes (sol nu ou chaume) sont inscrites en italique.
b) *Calculée :*

1) Formule de Turc

$$ETP = k \frac{t}{t + 15} (Ig + 50)$$

k = 0,37 en février, 0,40 pour tous les autres mois.
t = température moyenne mensuelle.

2) Formule de Bouchet

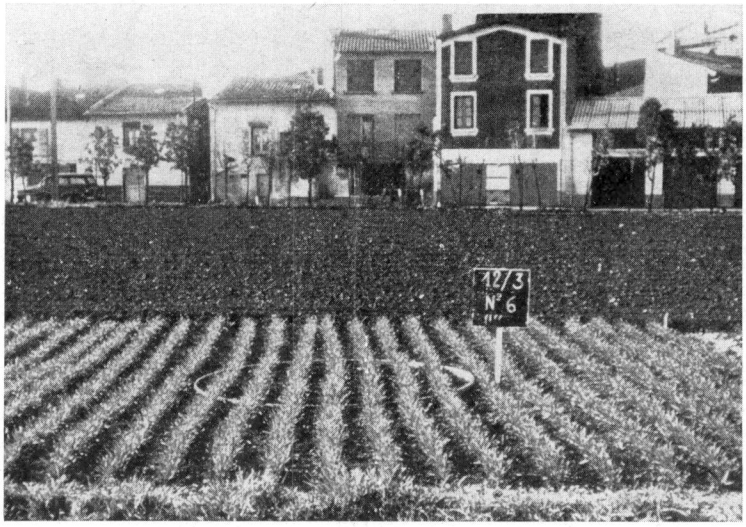
$ETP = 0{,}37\ Ea\ \lambda$
où Ea = Évaporation sous abri (Piche)

$$\lambda = f \frac{(\text{temp. moyenne} + \text{temp. au point de rosée})}{2}$$

3) Formule de Penman

$$E_o = \frac{d\ H/59 + A\ Va}{d + A} = \text{évaporation d'une nappe d'eau}$$

$H = Ig\ (1\text{-}r) - \sigma\ T_4\ (0{,}56\text{-}0{,}92\ \sqrt{e})\ (0{,}10 + 0{,}90\ S/So)$
où r = 0,05, albedo d'un plan d'eau
σ = coefficient de Stefan : $1{,}19 \times 10^{-7}$ cal. cm^{-2} $jour^{-1}$
T = température moyenne de l'air en °K
e = tension moyenne de vapeur d'eau de l'air en mm Hg.
d = dérivée en T, de la fonction : tension de vapeur staturante = $f(t)$ température
A = coefficient psychrométrique = 0,485
Va = pouvoir évaporant de l'air = $0{,}35\ (1 + 0{,}526\ u)(E\text{-}e)$
où u = vitesse du vent en m/s à 2 m du sol = vitesse à 20 m × 0,78.
E-e = déficit de saturation en mm Hg, à la température moyenne de l'air.
ETP = K × Eo
K = 0,6 de novembre à février
— 0,8 de mai à août
— 0,7 pendant les autres mois.



L'évapotranspiromètre de 3m² de surface est placé au centre d'une parcelle élémentaire carrée de 6 m de côté (Blé Cappelle 12-3-1959).

La surface environnante est ici en jachère ; elle portera par la suite une culture de Maïs.

Mise en place d'un évapotranspiromètre

4) Formule de Hargreaves

ET = K. 45,72 (0,38 - 0,0 038 h) d. t,
où h = humidité relative à 12 h,
d = coefficient mensuel de la durée du jour,
t = température moyenne °C,
les valeurs indiquées sont établies avec K (coefficient plante) = 1.

5) Formule de Blaney et Criddle

$$ET \text{ pouces} = \frac{K}{100} \cdot t \times p$$

t = température moyenne en °F
p = pourcentage de la durée moyenne du jour (rapportée à la durée annuelle)
K = coefficient plante, pris égal à 1
Nous avons utilisé les abaques G. Guyon C. R. E. G. R. n° 22 (ET en mm, temp. en °C)

6) Formule de Makkink

$$ETP = 0{,}0103 \text{ Ig } \frac{d}{d + 0{,}49} - {,}012$$

où d = dérivée en t (temps moy. de l'air) de la fonction : tension de vapeur saturante = f (t)

7) Formule de Thornthwaite

$ETP = ct^a$
voir pour application les tableaux indiqués par Thornthwaite.

	1956									
	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septemb.	Octob.	Nov.	Déc.	Moyennes ou Totaux
Pluie mm	25,9	118,9	60,8	86,6	89,6	94,8	37,7	14,6	27,0	555,9
θ moy. °C.....	8,6	14,6	14,8	18,2	17,1	17,2	10,8	4,3	5,2	12,3
Durée mens. insolation Heure.....	157,9	229,8	176,0	242,4	199,3	217,7	136,5	64,9	39,5	1464,0
Hygrom. moyenne ...	65,2	65,8	72,9	72,2	72,2	73,7	72,7	79,2	85,5	73,3
Vent m/s à 20 m.....	3,1	2,5	2,4	2,7	3,0	2,5	2,4	2,8	3,3	2,7
Piche mm/mois	105,7	134,7	91,7	105,3	111,5	84,5	64,1	—	—	697,5
E T mesurée mm										
Orge 1	42	(196) (*)	100	130	*97*	*35*	*27*	*18*	*29*	674
Orge 2	38	(191) (*)	108	134	*96*	*38*	*30*	*19*	*29*	683

(*) Fortes pertes au drainage.

	Janv.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Moy. ou Totaux
	1957												
Pluie mm.....	15,4	44,3	14,9	65,0	23,5	147,3	16,6	18,1	32,6	11,0	29,8	68,4	486,9
θ Moy. °C	1,5	8,0	10,5	9,4	11,2	17,4	19,5	18,0	15,7	11,6	5,8	1,9	11,0
Durée mensuelle insolation Heures	97,9	117,6	191,5	143,0	178,6	198,7	232,2	267,9	217,6	212,7	48,5	62,3	1968,5
Ig cal. cm^{-2} j^{-1}.....	112,4	180,6	307,5	319,2	394,0	436,4	460,1	463,9	354,0	267,0	88,5	77,4	288,4
E-e mm Hg	0,8	2,4	3,4	2,6	3,3	4,5	5,8	5,2	4,0	3,1	1,3	0,8	3,1
Hygrom. moyennes..	83,6	69,5	64,3	66,0	66,9	69,2	65,7	66,0	70,2	68,8	81,6	84,9	71,5
Hygrom. 12 h	75	66	50	52	49	49	44	44	51	47	77	81	57
Vent m/s à 20 m....	2,7	5,7	2,9	2,6	2,9	2,3	3,1	3,1	2,5	2,1	2,6	2,3	2,9
Piche mm/mois	—	—	—	96,6	110,5	104,3	155,3	134,9	96,9	82,9	—	—	814,8
E T P calculée (mm · $mois^{-1}$)													
Turc.....	5,8	29,0	58,6	56,1	74,6	103,1	114,3	113,1	82,4	54,5	15,0	5,6	712,1
Bouchet	—	—	—	78	101	114	187	142	96	71	—	—	
Penmann Eo.....	11,2	51,2	78,4	81,9	113,5	134,7	160,6	144,8	93,9	52,7	20,1	9,6	952,6
Hargreaves K = 1.	5,0	36,8	90,3	76,5	123,5	195,0	241,9	205,5	144,0	96,5	17,7	4,5	1237,2
Blaney-Riddle K = 1.....	55	79	107	112	138	170	181	161	138	101	68	53	1363
Makkink	12,1	21	52	51	63	84	95	94	66	46,0	9,6	7,1	601
Thornthwaite.....	3,8	27,1	47	45	63	109	128	105	76	50,5	17,8	4,1	676
E T P mesurée mm .	0	27	45	96	150	154	128	125	(145 [1])	63	31	30	994
ET mesurée Maïs....	*1*	*24*	*13*	*39*	27	86	80	122	82	20	*35*	*32*	561
	1958												
Pluie mm.....	33,3	23,8	45,9	33,7	118,6	48,7	54,1	54,7	93,1	27,6	76,0	45,0	654,5
θ Moy. °C.....	3,8	7,4	5,8	8,2	15,7	16,4	19,0	19,7	18,2	11,1	5,6	4,4	11,3
Durée mensuelle insolation Heures .	93,2	112,9	137,7	141,5	246,2	216,5	245,8	222,6	203,6	159,5	10,4	57,9	1 847,8
Ig cal. cm^{-2} j^{-1}.....	110,5	174,7	250,6	319,2	479,3	465,8	485,0	412,3	337,7	223,5	63,5	75,9	283,2
E-e mm Hg	1,3	2,6	2,1	2,5	4,2	4,35	4,9	5,5	4,7	2,8	0,9	1,5	3,1
Hygrom. moyennes..	77,5	66,1	70,1	68,9	68,0	67,9	69,7	68,0	69,7	72,0	87,0	76,5	71,8
Hygrom. 12 h	70	51	57	58	45	46	53	47	49	58	85	72	57
Vent m/s à 20 m	4,8	5,5	3,6	3,4	3,0	2,9	2,5	2,6	2,3	2,7	1,7	4,0	3,2
Piche mm $mois^{-1}$ ...	—	—	—	(101,4)	131,2	134,5	138,4	126,6	94,8	73,4	—	—	
E. T. P calculée (mm $mois^{-1}$													
Turc.....	12,8	27,4	32,5	51,7	108,0	107,3	119,8	103,6	83,7	45,9	12,3	11,1	716,1
Bouchet	—	—	—	82	132	135	165	157	100	65	—	—	
Penman Eo.....	23,5	45,6	61,1	83,4	143,5	144,3	156,6	137,0	97,2	39,7	14,7	21,7	968,3
Hargreave K = 1 .	14,5	49,4	42,0	65,7	185,8	195,2	197,2	213,8	163,0	73,5	11,1	15,6	1 226,8
Blaney Criddle K = 1.....	62	74	89	105	160	165	180	169	140	100	68	54	1 366
Makkink	12,4	22	35	49	93	87	98	86	66	37	6	7,4	599
Thornthwaite.....	10,1	23,1	21,4	37	91,5	98,5	121	115	89	46,5	16,2	11,3	680,6
E T P mesurée mm .	0	20	29	59	145	131	126	141	109	43	35	7	845
E T mesurée blé d'avril.....	*0*	*12*	*19*	24	96	132	95	*62*	*52*	*28*	*40*	*11*	571
Maïs *INRA 224* 60 000 ha.....	—	—	—	—	—	—	113	133	92	25	*44*	*1*	
Bett. sucrière 75 000 ha.....	—	—	—	—	—	—	92	111	89	37	*45*	*6*	

(1) Rupture du tube d'alimentation.

	1959												
	Janv.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Moy. ou totaux
Pluie mm.....	36,3	2,2	89,0	30,9	76,6	138,0	47,4	40,2	41,2	69,5	31,7	50,6	653,6
θ Moy. °C.....	3,5	5,1	9,0	11,1	14,3	17,9	21,2	18,7	17,7	12,5	7,3	6,6	12,1
urée mens. insolation Heures.....	101,8	153,6	127,9	200,3	237,9	228,3	265,8	240,6	142,7	171,1	91,6	76,4	2038,0
Ig cal. cm^{-2} j^{-1}	115,9	211,6	243,0	389,0	469,2	479,4	501,4	433,0	272,6	232,2	119,2	86,4	296,1
E-e mm Hg	1,7	2,2	2,8	4,1	4,1	4,8	7,5	5,3	4,9	3,2	1,8	1,7	3,7
Hygrom. moyennes..	70,8	66,7	67,3	59,0	66,9	68,4	59,6	66,9	67,6	71,5	76,0	76,9	68,1
Hygrom. 12 h	59	49	57	51	49	50	49	51	47	53	66	64	53,8
Vent m/s à 20 m	4,6	1,9	4,0	4,8	2,4	2,0	1,8	1,8	1,4	3,0	3,1	4,4	2,9
Piche mm/mois.....	—	—	—	144,1	129,5	133,5	143,2	123,2	87,4	81,7	57,9	—	900,5
E. T. P calculée (mm-mois^{-1})													
Turc	11,9	24,2	44,5	73,8	99,7	114,4	127,9	106,2	69,7	50,8	21,7	16,4	761,2
Bouchet	—	—	—	122	120	146	169	139	93	70	—	—	
Penman Eo	29,1	30,0	72,5	120,9	133,9	145,2	169,0	132,1	81,3	57,7	27,9	24,5	1 024,1
Hargreave K = 1..	19,0	35,5	66,4	103,6	157,9	197,5	239,7	187,0	132,4	92,1	32,7	30,0	1 293,8
Blaney Criddle ... K = 1	62	68	100	120	152	171	191	165	138	106	73	67	1 412
Makkink	13,3	26	38	65	88	94	109	89	52	40	15,6	10,2	640
Thornthwaite.....	8,0	13,4	35,2	51	80	109	135	107	84	51,5	20,5	17,0	712
E T P mesurée mm .	11	1,0	67	97	153	180 (1)	197	115	89	84	25	15	1 034
E T mesurée Blé *Capelle*	10	1,0	54	74	145	172	72	*42*	—	—	—	—	772
Moutarde blanche ..	—	—	—	—	—	—	—	—	85	69	*30*	*18*	
Maïs *INRA 224* 60 000 ha.....	*12*	*2,0*	*43*	*29*	68	112	173	116	56	*48*	*30*	*14*	703
Bett. sucr. 75 000 ha	*14*	*1,0*	*42*	*27*	63	139	200	117	61	46	*29*	*19*	758
	1960												
Pluie mm.....	29,9	43,2	44,3	13,6	52,5	105,8	39,2	151,8	43,9	90,2	21,5	16,6	652,5
θ moy. °C.....	2,7	5,7	8,6	9,7	15,3	17,9	17,4	17,7	14,3	11,6	8,7	2,2	11,0
Durée mens. insolation Heures	65,9	118,2	119,8	158,9	240,9	233,8	173,6	196,0	147,5	105,4	71,2	32,5	1 663,7
Ig cal. cm^{-2} j^{-1}....	93,4	178,0	235,4	339,1	469,2	485,6	389,3	381,4	280,8	174,2	103,9	61,1	266,0
E-e mm Hg	1,3	2,2	2,3	2,8	4,6	4,5	3,0	3,8	2,8	2,8	1,8	1,1	2,8
Hygrom. moyennes .	76,5	67,3	69,1	65	56	67	67	74	74	72	67	77	69,3
Hygrom. 12 h	68	49	49	54	37	48	44	44	51	54	62	73	53
Vent m/s à 20 m	3,4	4,0	3,7	3,7	2,7	2,2	2,3	2,7	2,3	4,1	4,5	3,5	3,3
Piche mm/mois	—	—	94,7	138,4	171,9	141,5	120,4	96,9	69,0	75,3	—	—	908,1
E. T.P. calculée (mm/mois^{-1})													
Turc.....	8,6	23,7	41,1	60,7	103,8	115,7	93,1	93,2	63,5	38,6	22,2	5,3	669,5
Bouchet	—	—	—	115	162	149	125	101	65	64	—	—	—
Penman Eo.....	20,5	42,9	65,1	92,4	142,0	138,0	117,8	117,8	73,2	55,8	22,8	17,4	905,7
Hargreave K = 1 .	11,4	38,4	75,5	85,0	208,1	205,8	216,0	204,2	122,8	84	44	7,5	1 302,7
Blaney Criddle K = 1.....	59	70	100	116	159	172	171	159	119	101	77	55	1 358
Makkink	9,3	21	36	55	90	95	77	77	49	28	13,8	11,2	562
Thornthwaite.....	7	19	37	46	92	111	108	103	68	48	28	6	673
E T P mesurée mm .	1,0	6	65	94	146	179	161	108	81	72	33	12	958
E T mesurée Blé *Cappelle*.....	0	6	62	104	154	175	62	*73*	*55*	*47*	*22*	*11*	771
Maïs *W 335* 60 000 ha.....	*3*	*8*	*35*	*37*	56	109	137	101	67	49	*23*	*10*	635
Orge *Rika*.....	*8*	*11*	*38*	61	131	133	69	*77*	—	—	—	—	—
Moutarde blanche								106	78	*48*	*26*	*10*	—

(1) Légères pertes au drainage.

	1961												
	Janv.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Moy. ou Totaux
Pluie mm.....	25,6	14,0	2,4	49,5	90,7	111,3	8,7	31,9	34,6	68,2	0,8	22,0	459,7
θ Moy. °C.....	3,8	9,8	8,4	13,5	12,9	17,8	18,7	18,4	20,2	12,8	6,6	4,5	12,3
Durée mens. insolation Heures	60,0	143,3	190,0	152,1	207,1	177,2	260,0	239,3	216,1	123,1	48,9	59,6	1 876,7
Ig cal. cm^{-2} j^{-1}....	90,6	203,8	307,5	334,1	428,7	411,9	507,2	433,0	354,0	191,6	119,5	75,9	288,2
E-e mm Hg	1,5	3,0	3,0	4,2	4,1	4,7	5,8	5,4	7,2	3,1	1,7	1,6	3,8
Hygrom. moyennes .	75	67	63	66	63	69	64	66	59	72	77	74	68
Hygrom. 12 h	66	50	45	51	49	50	46	46	39	59	72	70	54
Vent m/sec à 20 m...	3,6	4,4	2,5	3,2	2,9	1,9	3,0	2,0	3,4	2,8	2,8	—	3,0
Piche mm $mois^{-1}$ ..	—	—	112,0	129,9	130,7	128,4	151,5	127,9	160,0	68,8	—	—	1 009,2
E T P calculée (mm-$mois^{-1}$)													
Turc.....	11,2	36,6	50,1	72,2	88,1	99,8	122,6	106,3	92,1	44,5	21,0	11,6	756,1
Bouchet	—	—	—	121	118	139	164	138	183	62	—	—	—
Penman Eo.....	27,6	50,7	71,6	103,8	127,1	128,7	165,5	133,6	123,9	53,6	28,8	21,1	1 036,0
Hargreave K = 1 .	17	67	79	123	142	196	224	203	164	83	24	17	133,9
Blaney Criddle K = 1.....	62	81	99	131	146	171	179	162	148	107	71	61	141,8
Makkink	9,6	29	48	58	77	80	105	86	72	32	15	8	619,6
Thornthwaite.....	9	30	31	64	69	105	112	101	98	49	18	10	696
E T P mesurée mm.	12	28	— (1)	125	143	145	167	145	164	48	29	10	1 016
E T mesurée :													
Maïs 30 000 ha ...	*11*	*30*	*19*	*70*	84	73	115	131	109	32	*29*	*2*	705
Maïs 50 000 ha ...	*10*	*30*	*21*	*73*	90	73	126	135	125	25	*28*	*0*	736
Maïs 70 000 ha ...	*11*	*30*	*20*	*73*	83	82	139	149	145	28	*28*	*0*	788
Maïs 50 000 ha ... sol recouvert de plastique					31	48	119	80	44	13			

(1) Rupture de l'alimentation.

Ann. agron., 1962, **13** (6), 523-547

631. 432. 4

RESSUYAGE DU SOL ET CAPACITÉ DE RÉTENTION POUR L'EAU

A. FÉODOROFF
avec la collaboration technique de J. BALLIF

Laboratoire d'Études de Techniques culturales,
Centre national de Recherches agronomiques, Versailles (Seine-et-Oise)

SOMMAIRE

Un sol gorgé d'eau et soumis au ressuyage *per descensum* sur terre sèche voit son humidité décroître. La décroissance est d'abord rapide, puis change de rythme. Ce changement de rythme s'effectue pour une valeur particulière de l'humidité, concordant avec la capacité au champ, et qu'on peut considérer comme la capacité de rétention spécifique. Cette grandeur particulière est déterminée par deux méthodes de laboratoire différentes.

INTRODUCTION

La capacité de rétention pour l'eau a été depuis toujours considérée comme l'humidité d'un sol ressuyé à partir d'un état initial de saturation plus ou moins complète. Cette conception attribuait donc à la capacité de rétention la valeur d'une grandeur *statique*. Cependant des études assez récentes (OGATA, 1957, ORECHKINA, 1959) montrent qu'un sol initialement très humide se ressuye en permanence, sans que ce phénomène marque un palier au niveau de la capacité de rétention. Le ressuyage serait donc un phénomène *continu*, et il convient de replacer la notion de capacité de rétention dans un contexte dynamique, ce qui a déjà été signalé, notamment par DOLGOV (1948).

I. — MISE EN ÉVIDENCE DU PHÉNOMÈNE DE RESSUYAGE CONTINU

Tout ce qui suit concerne des sols initialement secs, ayant reçu une irrigation abondante, puis mis à l'abri de l'évaporation par une couverture superficielle appropriée. Les mouvements de l'eau étudiés ne sont donc que des mouvements *per descensum* vers un substrat sec. Après l'arrosage on détermine, couche par couche, l'humidité du sol à des intervalles de temps convenablement choisis.

En plein champ un tel travail systématique a été accompli par EDELFSEN et BODMAN (1941) sur une durée de plus d'un an, par OGATA et L. A. RICHARDS (1957) sur une durée de 50 jours, puis par BURROW et KIRKHAM (1958).

Au laboratoire nous avons pu reproduire ces phénomènes par deux méthodes différentes, dont les résultats se rejoignent.

A. — ÉVOLUTION DES PROFILS HYDRIQUES

a). *La méthode directe* (méthode A) consiste à remplir une série de tubes en verre (hauteur 30 cm, diamètre 3 cm env.) avec un même sol passé préalablement à travers un tamis. Ces colonnes sont soumises au même arrosage (dose et intensité), puis l'orifice supérieur du tube est bouché avec une éponge humide recouverte

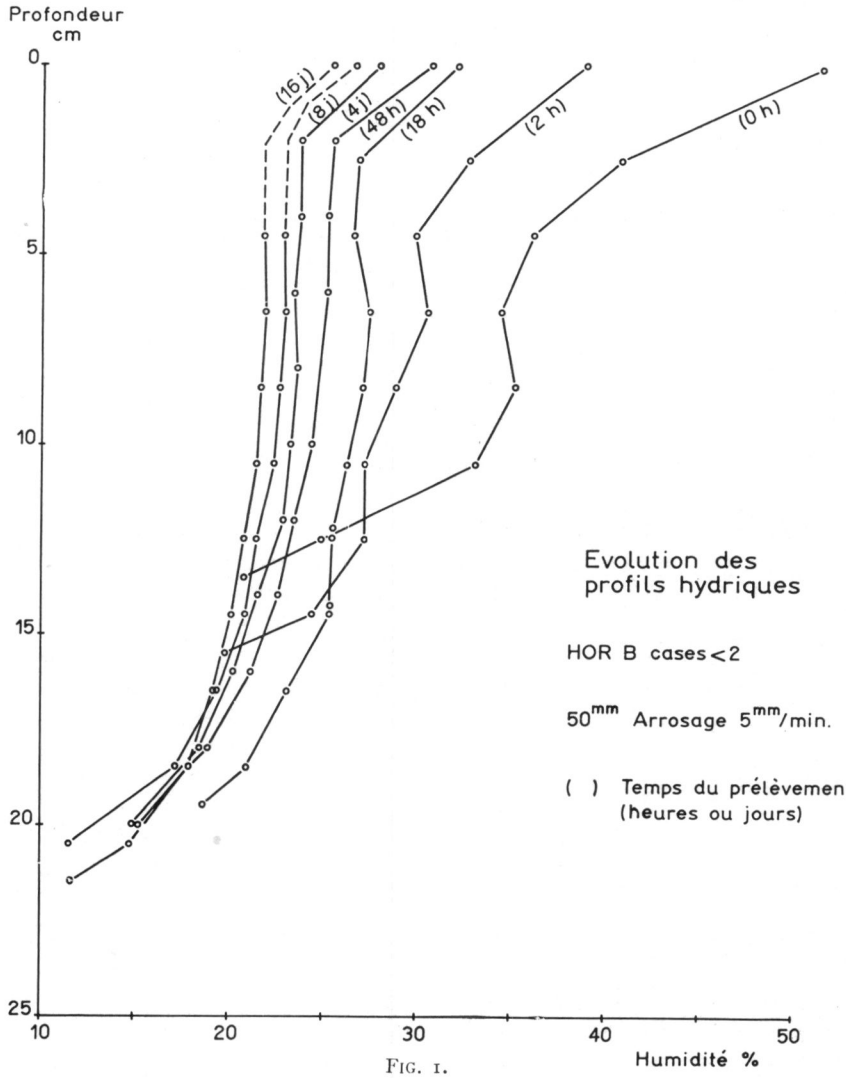


FIG. 1.

d'un carré de toile plastique serré sur le tube par un caoutchouc. Nos essais, avec une dose d'arrosage de 50 mm, ont duré 16 jours. Au cours de cette période les tubes sont successivement sacrifiés, et on établit leurs profils hydriques en prélevant un échantillon tous les deux cm, et en déterminant l'humidité par passage à l'étuve à 105°. La dose d'arrosage est telle que le bas de la colonne de terre reste toujours sec.

b) *Résultats.* — L'examen des 7 profils hydriques obtenus (au temps 0, 2 h, 18 h, 2 j, 4 j, 8 j, 16 j) montre (fig. 1) que d'une part le front d'eau ne cesse de progresser, et que d'autre part à chaque niveau l'humidité décroît continuellement. Ce fait rejoint des observations faites dans des conditions expérimentales analogues par MARSHAL et STIRK (1949), STAPLE et LEHANE (1954), ORECHKINA (1959).

TABLEAU I

Évolution de l'humidité (% de poids) couche par couche.
Horizon B des cases lysimétriques de Versailles (< 2 mm)
Arrosage de 50 mm

Mode d'arrosage	Profondeur considérée (cm)	Temps depuis la fin de l'arrosage (1) (jours)						
		0	1/12	3/4	2	4	8	16
5 mm/mn	2	43,0	33,8	27,8	25,5	23,7	23,0	21,8
	5	35,6	30,0	26,6	25,1	23,6	22,8	21,8
	10	34,5	27,5	26,3	24,3	23,2	22,4	21,6
0,2 mm/mn	2	34,3	27,7	26,1	25,0	23,9	22,8	21,2
	5	32,8	27,7	25,2	24,9	24,0	22,2	21,0
	10	32,0	27,3	25,4	24,1	23,6	21,8	20,6

(1) ou la résorption du plan d'eau en surface pour l'arrosage 5mm/mn.

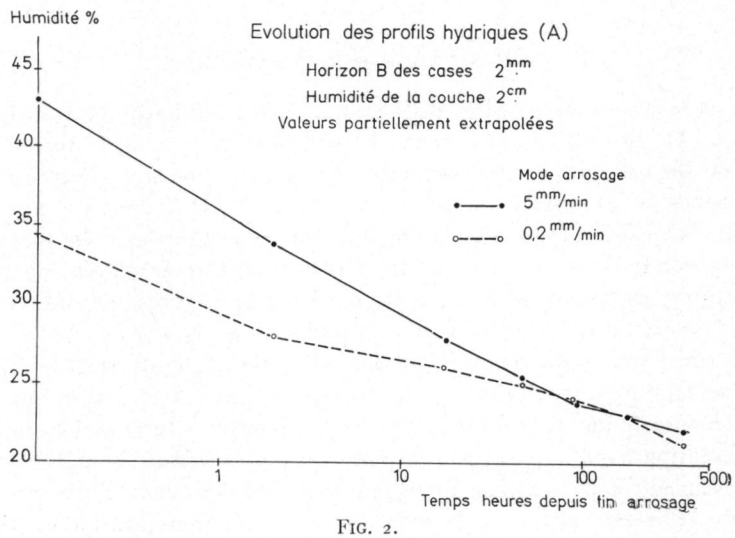


FIG. 2.

La représentation graphique de l'humidité (h) en fonction du logarithme vulgaire du temps (jours) est quasiment linéaire, avec cependant une tendance à marquer une courbure vers les h croissants pour les temps élevés (fig. 2). OGATA et RICHARDS ont montré que la relation entre l'humidité à un niveau donné et le temps (t) serait :

$$h = at^{-1/b} \qquad \text{(I)}$$

où « a » et « b » sont deux paramètres (pour ces auteurs $b = 0{,}128$, c'est-à-dire $1/b$ est égal à 7,8 env.).

En ajustant les paramètres « a » et « b », nous avons obtenu une bonne représentation de nos données expérimentales par cette formule.

TABLEAU 2

Horizon B des cases (< 2 mm)
Dose d'arrosage 50 mm

Mode d'arrosage	Profondeur (cm)	Paramètres	
		a	*b*
5 mm/mn	2	27,2 ± 0,4	12
	5	26,9 ± 0,4	12
	10	25,8 ± 0,4	14
0,2 mm/mn	2	26,8 ± 0,2	12
	5	26,5 ± 0,2	12
	10	25,5 ± 0,4 à 25,9 ± 0,4	12 à 14

On constate donc que malgré une divergence sur la valeur des paramètres (qui reflètent probablement diverses propriétés du sol) l'application de la même formule permet de représenter le même phénomène dans des conditions expérimentales très différentes (au champ et au laboratoire).

B. — RESSUYAGE SUR TERRE SÈCHE

a) *La méthode indirecte,* (B), utilisée par DOLGOV (1948) et par L. A. RICHARDS et C. D. MOORE (1952) consiste à faire ressuyer sur de la terre sèche une petite masse de sol initialement humecté en excès. Dans nos essais nous avons utilisé des tubes de 30 mm de diamètre fermés à leur partie inférieure par une gaze en nylon. Le sol sec tamisé à 1 ou 2 mm suivant les échantillons est placé dans ce tube. Cette colonne de terre est humectée par capillarité puis placée sur une masse plus importante de la même terre, mais séchée à l'air, contenue dans un bêcher de 250 cc. Pour réduire l'hétérogénéité éventuelle de la répartition de l'eau dans la colonne de terre, nous lui avons fixé une faible hauteur (4 cm). Ainsi le rapport des masses terre humide/terre sèche est de l'ordre de 1/6. Pour assurer un meilleur contact entre la colonne de terre humide et son support de terre sèche, on introduit après humectation dans la partie supérieure du tube un bâton en matière plastique rigide, de longueur telle qu'il ne tasse pas la terre, mais la maintienne. L'orifice supérieur du tube est ensuite coiffé avec un capuchon imperméable en tissu plas-

tique, et l'ensemble du tube ainsi monté est appliqué énergiquement sur la terre sèche, et maintenu ensuite solidaire du bêcher par un fort caoutchouc.

Ainsi l'humidité contenue initialement dans la colonne supérieure passe progressivement dans le support de terre sèche sous l'effet des forces de gravité et de succion, mais absolument à l'abri de l'évaporation.

Pour chaque sol étudié, une série de tubes permet de faire des prélèvements d'humidité échelonnés dans le temps, chaque tube étant sacrifié. L'humidité est déterminée sur une carotte de 1 cm^2 de section environ, et de longueur égale à la colonne de terre. Après passage à l'étuve à 105°, on calcule l'humidité moyenne h de la colonne au temps voulu.

b) *Résultats.* — De très nombreux essais que nous avons faits sur des sols variés au point de vue texture et propriétés structurales, montrent que l'humidité de la colonne de terre décroît rapidement dans la phase initiale du ressuyage, puis la décroissance est de plus en plus lente. En première approximation la représentation la plus commode de ce phénomène est une expression de la forme

$$h = a - b \log 10\ t \qquad \text{(II)}$$

plus explicite que la représentation arithmétique de Dolgov. Notre représentation s'applique dans une gamme d'humidité allant depuis la saturation presque complète

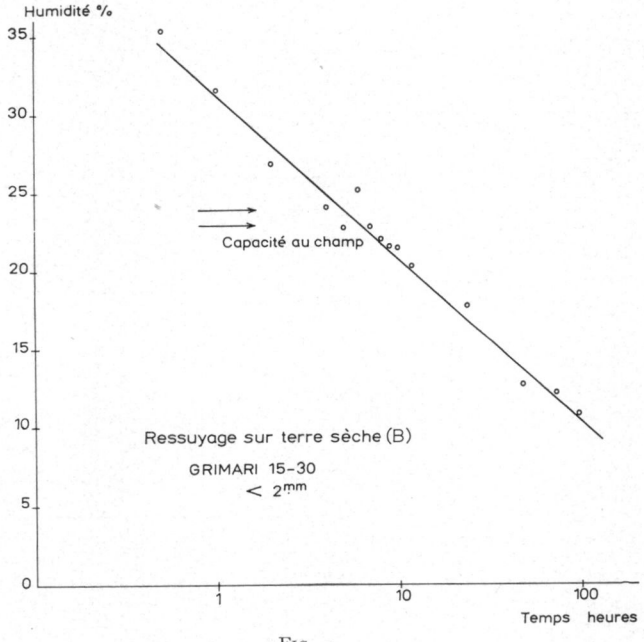


Fig. 3.

jusqu'au voisinage probable du point de flétrissement permanent (fig. 3, 4, 5). Remarquons que pour certains sols étudiés, l'évolution de l'humidité doit être représentée

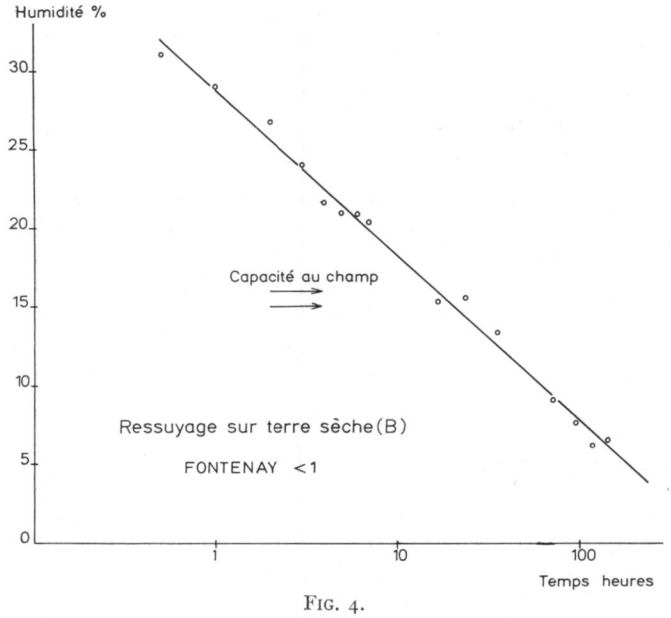

Humidité %
30
25
20
15
10
5
0
Capacité au champ
Ressuyage sur terre sèche (B)
FONTENAY <1
1
10
100
Temps heures

FIG. 4.

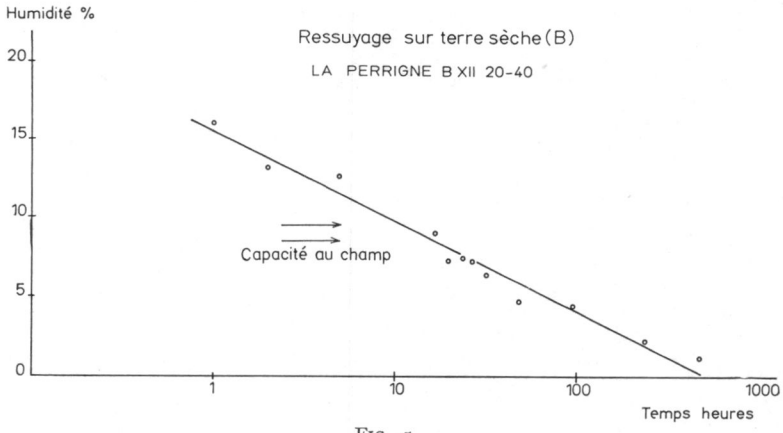

Humidité %
Ressuyage sur terre sèche (B)
LA PERRIGNE B XII 20-40
20
15
10
5
0
Capacité au champ
1
10
100
1000
Temps heures

FIG. 5.

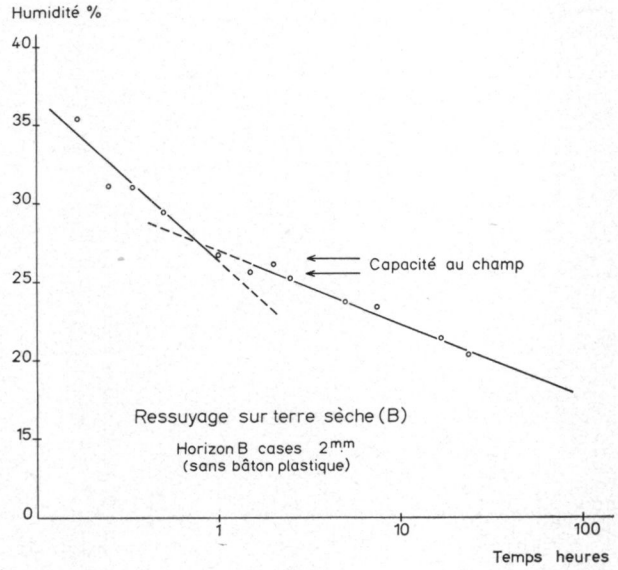

Humidité %
40
35
30
25
20
15
0
Capacité au champ
Ressuyage sur terre sèche (B)
Horizon B cases 2mm
(sans bâton plastique)
1
10
100
Temps heures

FIG. 6.

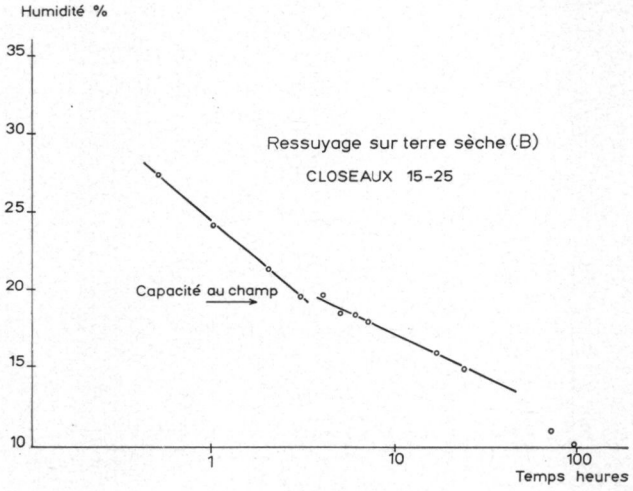

Humidité %
35
30
25
20
15
10
Ressuyage sur terre sèche (B)
CLOSEAUX 15-25
Capacité au champ
1
10
100
Temps heures

FIG. 7.

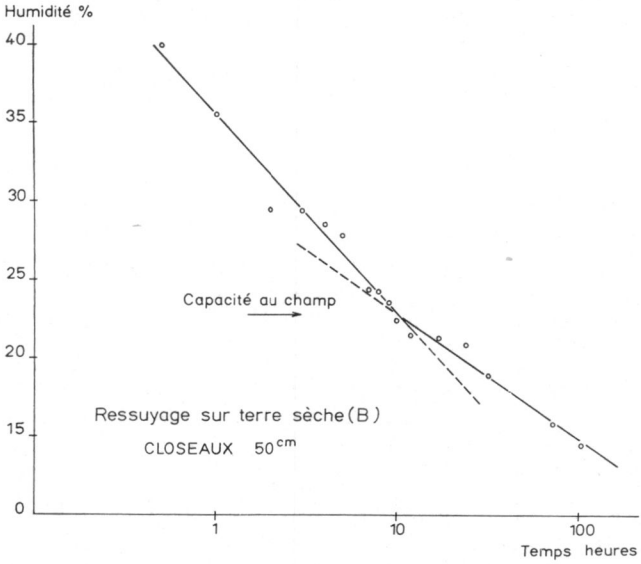

Humidité %
40
35
30
25
20
15
0
Capacité au champ
Ressuyage sur terre sèche (B)
CLOSEAUX 50 cm
1
10
100
Temps heures

FIG. 8.

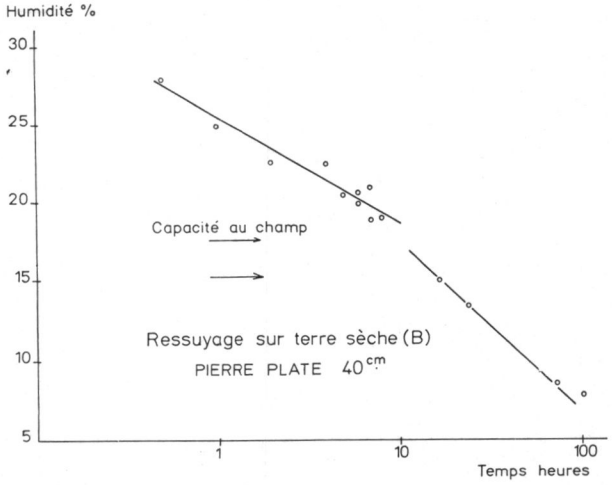

Humidité %
30
25
20
15
10
5
Capacité au champ
Ressuyage sur terre sèche (B)
PIERRE PLATE 40 cm
1
10
100
Temps heures

FIG. 9.

successivement par deux (fig. 6, 7, 8, 9) ou même trois (fig. 10) branches de droites semi-logarithmiques, à pentes significativement différentes mais évidemment toujours négatives.

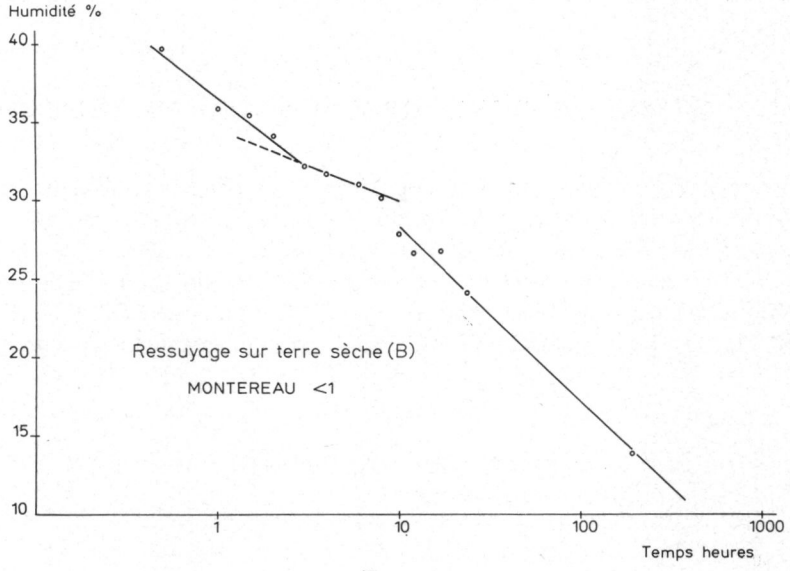


FIG. 10.

L'exemple suivant, obtenu avec un sous-sol argilo-sableux de la Station expérimentale de Grimari (EA 1, prof. 15-30 cm) (fig. 3) permet d'illustrer numériquement les résultats d'un tel essai.

TABLEAU 3

Temps (heures) t	0,5	1	2	4	5	7	8	
Humidité moyenne de deux mesures h % ..	35,4	31,6	26,9	24,1	22,8	22,2	22,0	Pour l'ensemble des points
Temps (heures) t.....	9	10	12	24	48	72	96	$h\ \% = -10{,}43 \log 10\ t + 41{,}64$
Humidité % moyenne de deux mesures ...	21,6	21,5	20,3	17,8	12,7	12,1	10,7	Regression significative au seuil 1 % Snédecor

c) La conclusion provisoire qui se dégage de l'ensemble de ces essais est que le ressuyage d'un sol est un phénomène qui se prolonge dans le temps pour atteindre des valeurs relativement très faibles de l'humidité. Ce résultat est indépendant de la méthode employée, mais le processus est accéléré avec la méthode indirecte, probablement du fait que la masse du sol initialement humide est faible par rapport à celle du sol sec sous-jacent.

Une expression de l'évolution de l'humidité en fonction de log t donne de cette

dynamique une représentation approchée très valable au premier abord. Nous verrons, plus loin (III) ce qu'il faut en penser.

Nous ne discuterons pas ici de la nature des forces physiques qui sont à l'origine de ces phénomènes : ce problème fera l'objet d'un travail ultérieur.

II. — VITESSE DE RESSUYAGE ET CAPACITÉ DE RÉTENTION

Si le ressuyage d'un sol est un phénomène continu représentable par une équation linéaire logarithmique en fonction du temps qui ne montre pas toujours une cassure pour une valeur particulière de l'humidité, il n'en demeure pas moins vrai que les observations des chercheurs et des praticiens, faites à l'échelle du temps arithmétique qui est celle de la pratique, font état d'un ressuyage d'abord rapide, puis lent (fig. 11). S'il n'en avait pas été ainsi, le concept même de capacité de réten-

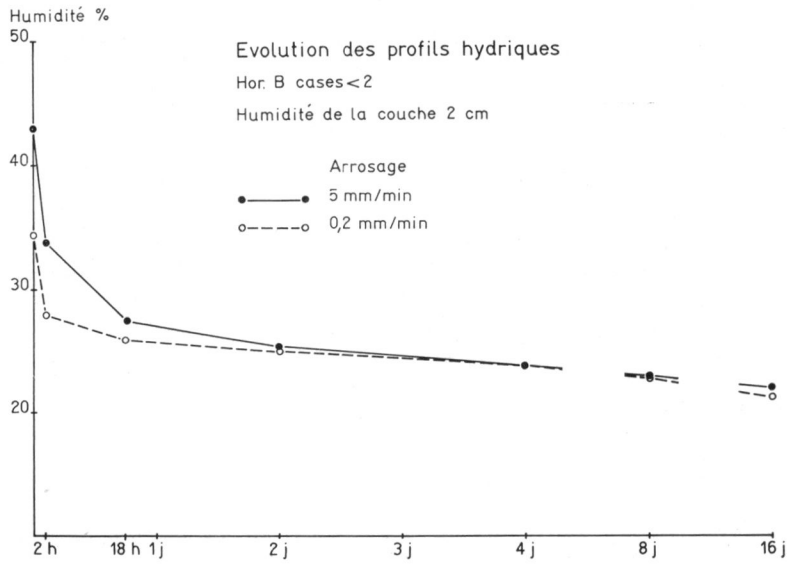


FIG. 11.

tion pour l'eau ne se serait jamais fait jour. A cet égard il n'est donc pas illogique de se fixer une échelle des temps adaptée aux conditions d'observation, et de calculer pour des intervalles de temps déterminés les « vitesses de ressuyage ».

Pour chaque essai nous avons une série des temps, t_1, t_2, t_3... t_n, auxquels ont été effectués les prélèvements donnant respectivement les humidités h_1, h_2, h_3... h_n. En prenant $\frac{h_{n-1} - h_n}{t_n - t_{n-1}}$ on obtient une grandeur positive $\Delta h/\Delta t$ qui représente la « vitesse de ressuyage » moyenne dans l'intervalle de temps $t_{n-1} - t_n$.

Nous avons appliqué ce calcul à nos divers essais de laboratoire. Les deux exemples suivants illustrent les résultats obtenus, avec l'horizon B des cases (< 2 mm), pour les deux méthodes expérimentales.

TABLEAU 4

« *Vitesse de ressuyage* »

	Temps (jours)	0	1	2	4	8	16	
Méthode directe (A)	Humidité (%)	43,0	27,3*	25,5	23,7	23,0	21,8	
Évolution de profils hydriques.	Intervalle de temps (jours)	0 à 1		1 à 2	2 à 4		4 à 8	8 à 16
Arrosage 5 mm/mn Profondeur : 2 cm	$\Delta h/\Delta t$ en p. 100/jour	15,7		1,8	0,9		0,20	0,15

	Temps (heures)	0	1/3	1/2	1	1,5	5	17	24	
Méthode indirecte (B)	Humidité (%)	45,3	31,0	29,4	26,7	25,6	23,7	21,4	20,2	
Ressuyage sur terre sèche	Intervalles de temps (heures)	0 à 1/3	1/3 à 1/2	1/2 à 1	1 à 1,5	1,5 à 5		5 à 17	17 à 24	
	$\Delta h/\Delta t$ en p. 100/heure	42,9	7,6	5,4	2,2	0,54		0,19	0,17	

* Intrapolé.

Le ralentissement de la vitesse de ressuyage apparaît d'une façon très nette au bout d'un jour avec la méthode A (fig. 11) qui représente probablement les conditions de plein champ. La méthode B est à cet égard moins explicite. Avec l'exemple cité [1] il n'apparaît pas de ralentissement net de la vitesse de ressuyage. Pourtant la représentation graphique de l'humidité en fonction de log 10 t montre pour ce sol un changement de pente pour t voisin de 0 H 45 et $h = 27{,}4$ p. 100 (fig. 6).

Il y a donc là une contradiction que nous avons cherché à lever.

En exprimant graphiquement $\Delta h/\Delta t$ *en fonction du temps*, nous avons constaté qu'en réduisant les intervalles de temps, la courbe tend vers une allure hyperbolique, et que par conséquent, la recherche d'un point singulier sur une telle courbe est à priori infructueuse. Par ailleurs, il convient de remarquer que dans l'esprit de cette étude, le *temps* comme variable indépendante nous intéresse relativement peu : nous cherchons en effet à déterminer l'*humidité* correspondant à un changement de la vitesse de ressuyage.

Nous avons donc cherché s'il existe une relation entre la « vitesse de ressuyage » $\Delta t/\Delta h$ et l'humidité du sol. Pour chaque intervalle de temps nous avons calculé l'humidité moyenne du sol, en faisant la moyenne arithmétique des valeurs de l'humidité aux bornes de cet intervalle. Voici un exemple numérique obtenu avec le sous-sol argilo-sableux de Grimari.

[1] Exceptionnellement cet essai avec la méthode B a été pratiqué d'une façon simplifiée, sans introduire le bâton plastique. Un contrôle a montré que cela n'a pas modifié l'allure générale des résultats.

TABLEAU 5

Vitesse de ressuyage (B) et Humidité
Sous-Sol Grimari

Intervalle de temps (heures)	1/2 à 1	1 à 2	2 à 4	4 à 8	8 à 12	12 à 24	24 à 48	48 à 72	72 à 96
$\Delta h/\Delta t$ % heures.....	7,6	4,7	1,4	0,52	0,42	0,21	0,21	0,2	0,06
Humidité moyenne de l'intervalle %	33,5	29,2	25,5	23,05	21,15	19,05	15,25	12,4	11,4
Humidité minima de l'intervalle %	31,6	26,9	24,1	22,0	20,3	17,8	12,7	12,1	10,7

Si on porte sur un graphique les valeurs de $\Delta h/\Delta t$ en ordonnée, les valeurs d'humidité en abscisse, on constate que ces deux grandeurs sont liées par une double relation linéaire : une droite à pente positive faible pour les basses humidités, puis une droite à pente forte pour les humidités élevées (fig. 12). *Nous supposons que*

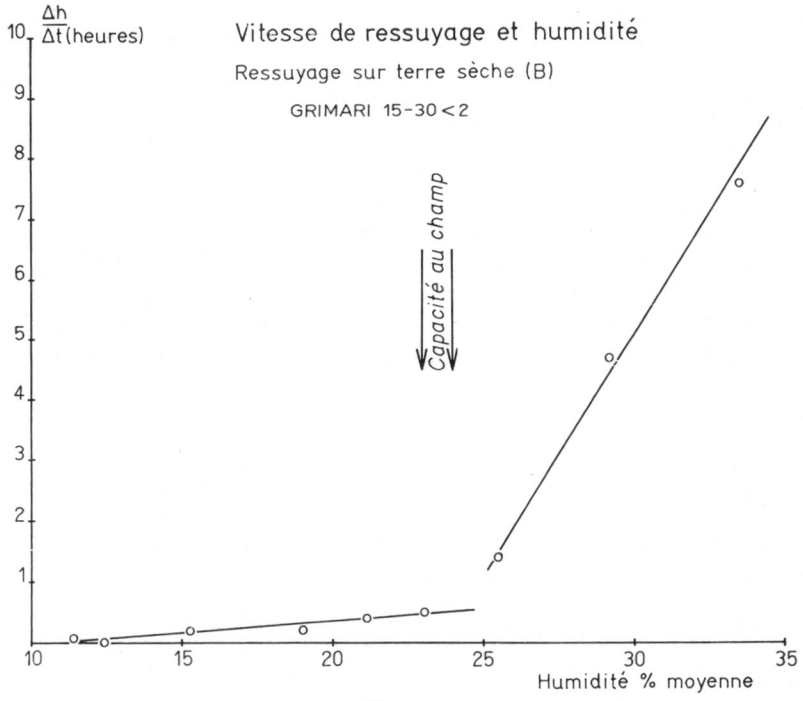


FIG. 12.

le point, ou la zone d'intersection de ces droites a pour abscisse la capacité de rétention pour l'eau. Les valeurs de la capacité de rétention ainsi obtenues sont comparées à la capacité au champ. Pour préciser s'il est préférable de porter en abscisse l'humidité moyenne ou l'humidité minima pour chaque intervalle de temps, nous avons dressé pour tous les sols étudiés deux séries de graphiques. Les fig. 12 à 21 montrent

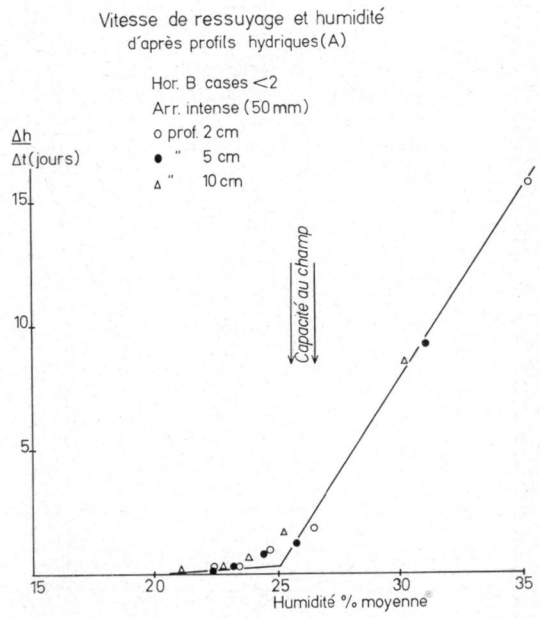

Vitesse de ressuyage et humidité
d'après profils hydriques (A)
Hor. B cases <2
Arr. intense (50 mm)
o prof. 2 cm
● " 5 cm
Δ " 10 cm
Δh
Δt (jours)
15
10
5
Capacité au champ
15
20
25
30
35
Humidité % moyenne

FIG. 13.

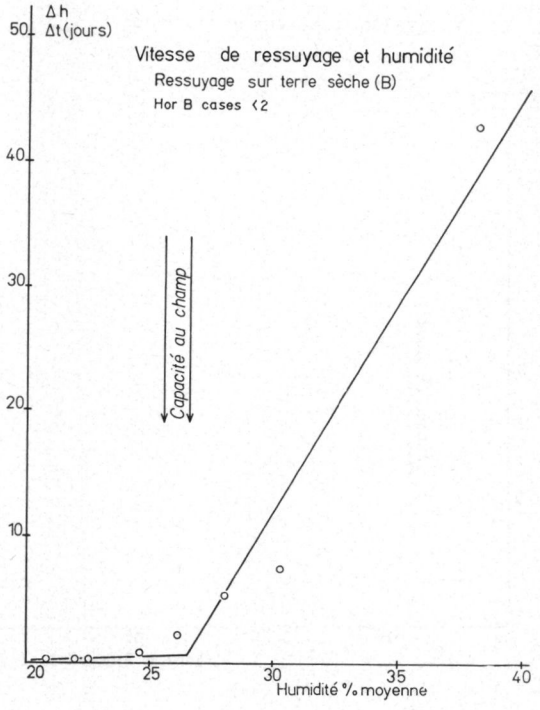

Δh
Δt (jours)
50
40
30
20
10
Vitesse de ressuyage et humidité
Ressuyage sur terre sèche (B)
Hor B cases <2
Capacité au champ
20
25
30
35
40
Humidité % moyenne

FIG. 14.

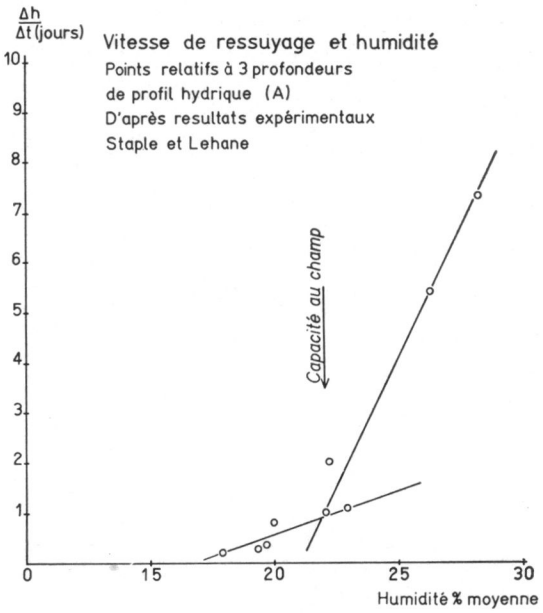

Δh
Δt (jours)
Vitesse de ressuyage et humidité
Points relatifs à 3 profondeurs
de profil hydrique (A)
D'après resultats expérimentaux
Staple et Lehane
Capacité au champ
10
9
8
7
6
5
4
3
2
1
0
15
20
25
30
Humidité % moyenne

FIG. 15.

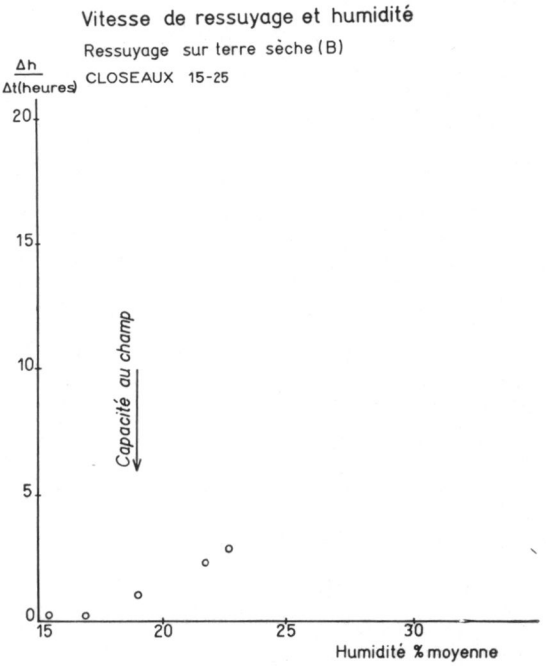

Vitesse de ressuyage et humidité
Ressuyage sur terre sèche (B)
CLOSEAUX 15-25
Δh
Δt (heures)
Capacité au champ
20
15
10
5
0
15
20
25
30
Humidité % moyenne

FIG. 16.

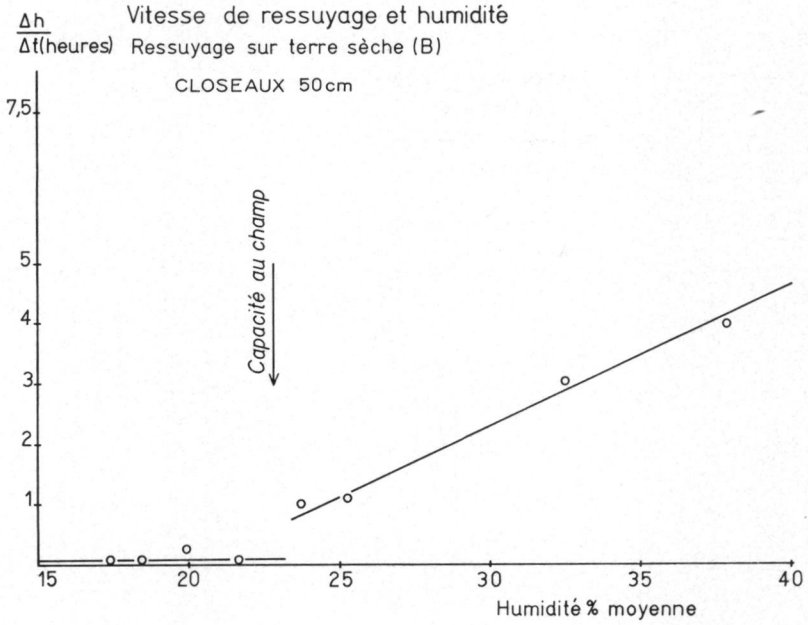

Δh / Δt (heures)
Vitesse de ressuyage et humidité
Ressuyage sur terre sèche (B)
CLOSEAUX 50cm
7,5
5
4
3
2
1
Capacité au champ
15
20
25
30
35
40
Humidité % moyenne

FIG. 17.

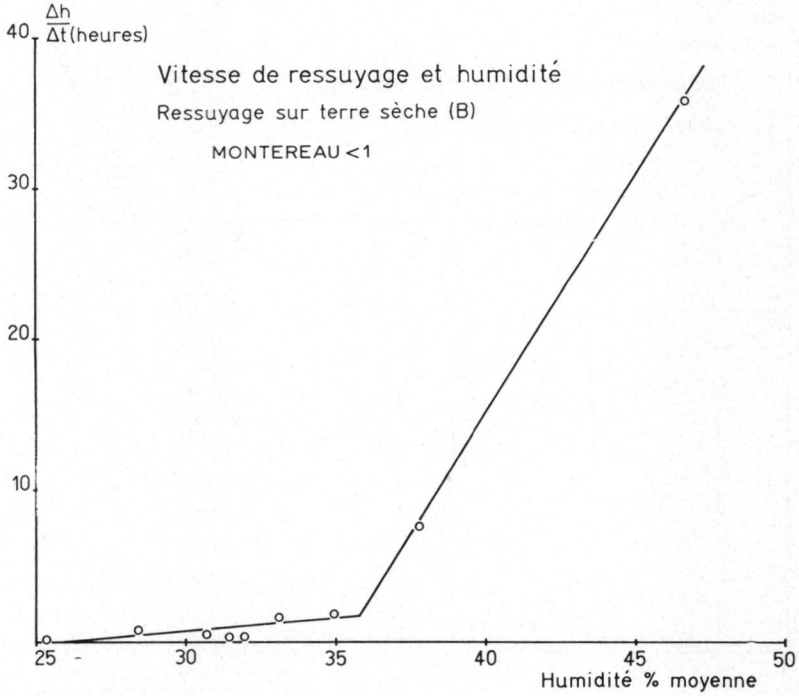

Δh / Δt (heures)
40
Vitesse de ressuyage et humidité
Ressuyage sur terre sèche (B)
MONTEREAU <1
30
20
10
25
30
35
40
45
50
Humidité % moyenne

FIG. 18.

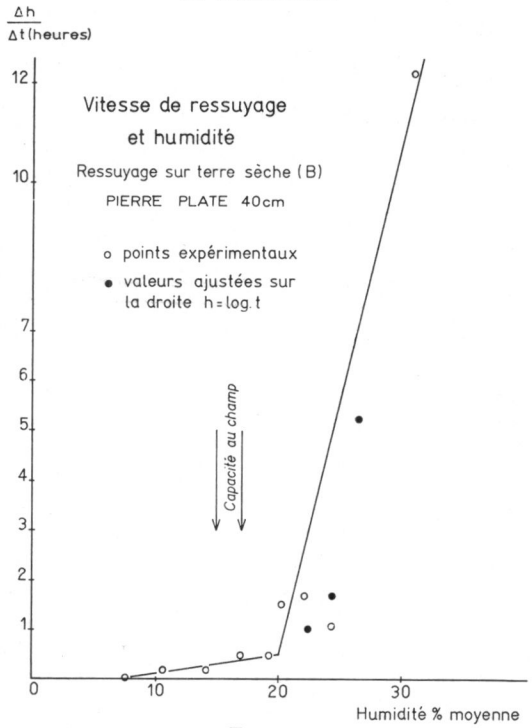

Δh
Δt (heures)
Vitesse de ressuyage
et humidité
Ressuyage sur terre sèche (B)
PIERRE PLATE 40cm
o points expérimentaux
• valeurs ajustées sur
la droite h=log.t
Capacité au champ
12
10
7
6
5
4
3
2
1
0
10
20
30
Humidité % moyenne

FIG. 19.

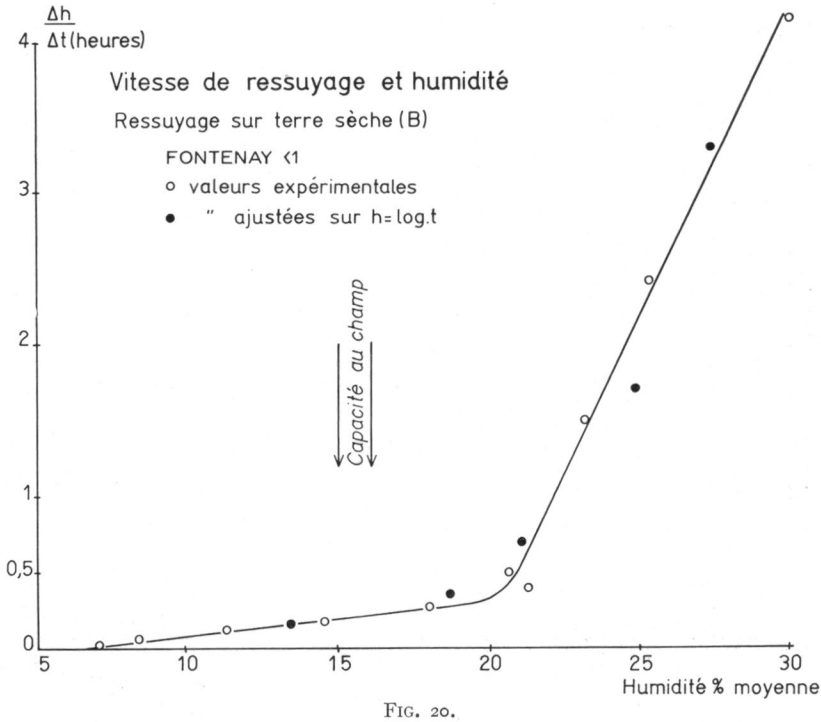

Δh
Δt (heures)
Vitesse de ressuyage et humidité
Ressuyage sur terre sèche (B)
FONTENAY <1
o valeurs expérimentales
• " ajustées sur h=log.t
Capacité au champ
4
3
2
1
0,5
0
5
10
15
20
25
30
Humidité % moyenne

FIG. 20.

l'allure de ces courbes avec en abscisses l'humidité moyenne. Les droites ne sont pas calculées, mais tracées approximativement.

Nous admettons avec A. RODE (1960) que la capacité au champ ne peut pas toujours être déterminée avec une grande précision et sa valeur peut varier de + 10 à 15 p. 100 de la valeur moyenne. C'est pourquoi pour la plupart des sols étudiés nous considérons *la zone de la capacité au champ*.

Pour un des sols étudiés (Montereau) nous n'avons pas de détermination de cette zone. Les quelques mesures faites sur le terrain, ainsi que sa composition granulométrique argileuse, donnent cependant des raisons de penser que la capacité au champ est supérieure à 30 p. 100 d'humidité.

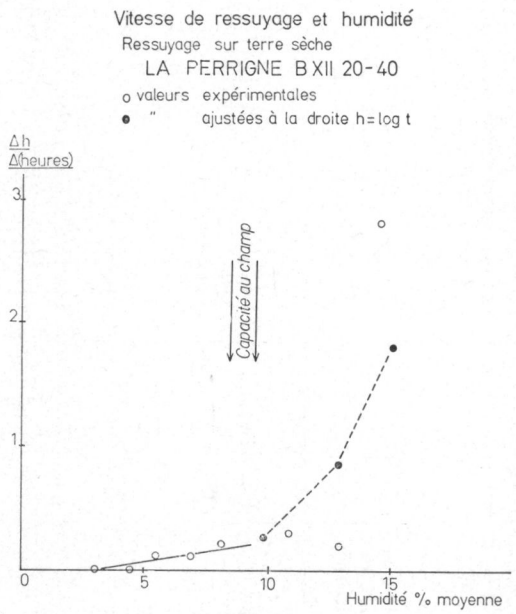


FIG. 21.

Ces remarques étant faites, l'ensemble des résultats (tabl. 6) appelle plusieurs constatations :

1° Tous les sols étudiés possèdent une valeur caractéristique de l'humidité, qui correspond à un ralentissement de la vitesse de ressuyage.

2° Ces humidités caractéristiques couvrent une assez grande gamme (10 à 36 p. 100), liée à la texture des sols étudiés.

3° On obtient des résultats très voisins en employant l'une ou l'autre des méthodes expérimentales et l'un ou l'autre mode d'expression graphique (abscisses en humidité moyenne ou humidité minima).

4° La concordance de la capacité de rétention (méthode graphique) avec la capacité au champ est bonne dans l'ensemble. Les meilleurs résultats sont obtenus avec l'humidité moyenne en abscisses (sauf pour les Closeaux 15-25). Les discordances peuvent provenir aussi bien de la détermination de la capacité au champ, qui est délicate. Par ailleurs le fait de travailler au laboratoire avec des terres tamisées

TABLEAU 6

Changement de vitesse de ressuyage et capacité au champ, comparaison pour les différents sols étudiés.

Sol			Méthode expérimentale	Capacité de rétention Méthode graphique avec		Capacité au champ	
Origine et profondeur (cm)	Nature	Dimension supérieure (mm) de l'échantillon traité		Humidité moyenne	Humidité min.	*h* (%)	Auteur
Cases Versailles	Horizon B argilo-limoneux	2	A (arr. int.)	25 à 26	25	26	G. MONNIER (com. verb.)
— —	— —	2	B	26 à 27	29		
W. M. (Canada).....	Limon argileux	?	A	22 à 23	21	22	Staple et Lehane (1954)
Grimari 15-30	Argilo-sableux	2	B	24 à 25	22,5	23-24	R. MOREL (com. verb.)
Closeaux 15-25.	Argilo-limoneux	2	B		21	19,2	GRAS (com. verb.)
Closeaux 50	Argilo-limoneux	2	B	22	21	22,8	
Montereau	Argileux	1	B	35-36	35		
Fontenay	Sable fin organique	1	B	20	20-21	15 à 16	R. BETREMIEUX (com. verb.)
Fontenay	— —	1	A	16-18	16		
Pierre plate (sous-sol) ..	Sable fin non organique	2	B	20 (1)	20 (1)	16,5	R. GRAS (com. verb.)
La Perrigne (sous-sol)..	Sable grossier non organique	1	B	9 à 10 (1)	10 (1)	8,5-9,5	A. FEODOROFF

(1) Les graphiques ont été dressés avec les valeurs ajustées de l'humidité, d'après notre relation $H = a - b \log 10\ t$, pour réduire la dispersion des points expérimentaux.

peut également affecter les résultats. La seule discordance sérieuse, qui concerne l'ordre de grandeur du résultat, porte sur les deux sols sableux (fig. 19 et 20) (Fontenay et Pierre Plate) et pourrait s'expliquer ainsi : les manipulations (méthode B) comportent une saturation initiale assez poussée de la terre par l'eau ; cela entrainerait un glissement des particules sableuses qui modifierait la porosité et par conséquent la capacité de rétention. Il est également possible qu'après tamisage, ces sables aient un volume des vides plus grand qu'au champ : en opérant d'une façon analogue sur un sable de composition voisine, RICHARDS et MOORE (1952) ont constaté que la rétention était diminuée si l'échantillon de sol à humecter était préalablement tassé. Nous-mêmes avons réduit l'écart entre la capacité au champ et la capacité de rétention (méthode graphique) pour le sol de Fontenay en employant la méthode des profils hydriques (A) et en tassant l'échantillon de façon à l'amener à une densité apparente voisine de celle qu'il a en place (1,40).

III. — DISCUSSION SUR LA REPRÉSENTATION DU PHÉNOMÈNE DE RESSUYAGE ET SUR SA CONTINUITÉ

Nous avons noté plus haut que si on représente la variation de l'humidité d'une couche de sol en fonction de logt, on obtient une ou plusieurs droites calculées par la méthode statistique. Quand il n'y a qu'une droite, aucune discontinuité n'apparaît dans le phénomène (fig. 3) et, par conséquent, l'existence d'une valeur caractéristique de l'humidité (capacité de rétention) est mise en cause. Par contre si on exprime le même phénomène par les vitesses de ressuyage $\Delta h/\Delta t$, on trouve une cassure (fig. 12).

Remarquons que notre valeur empirique $\Delta h/\Delta t$ correspond en fait au signe près à la dérivée de la fonction à déterminer reliant l'humidité d'une couche donnée au temps.

En prenant le problème à l'envers, c'est-à-dire à partir de notre relation linéaire graphique entre $\Delta h/\Delta t$ et h, on peut écrire que

$$dh/dt = Ah + B \qquad \text{(III)}$$

ou encore

$$\frac{dh}{h + B/A} = A dt \qquad \text{(IV)}$$

En intégrant l'équation (IV) on obtient

$$L\ (h + B/A) = At + C$$

d'où

$$h + B/A = \exp\ (At + C)$$
$$h = \exp\ (At + C) - B/A \qquad \text{(V)}$$

On détermine la constante d'ingrégration C en faisant $t = 0$. Il vient

$$C = L\ (h_0 + B/A).$$

La relation générale devient donc :

$$h = (h_0 + B/A)\, e^{At} - B/A \qquad (VI)$$

avec A négatif et B positif du fait que l'humidité décroît avec le temps et que donc en (III) dh/dt est négatif, alors que h est évidemment toujours positif.

Ce raisonnement nous conduit donc à admettre que l'expression de la variation de l'humidité d'une couche donnée en fonction du temps est exponentielle. De plus, comme nous avons pour chaque sol deux droites [1] d'équation générale (III), on doit intégrer deux fonctions et obtenir *deux* fonctions exponentielles, pour décrire l'évolution de l'humidité depuis la saturation assez prononcée jusqu'à un état poussé de sécheresse : l'une de ces fonctions dominera au-dessus de la capacité de rétention, l'autre dessous.

Ce fait souligne donc que la valeur de la capacité de rétention est une valeur particulière de l'humidité spécifique du sol, puisque deux lois différentes décrivent le transfert de l'eau suivant qu'on est au-dessus ou en dessous de cette grandeur.

$$\text{Pour } h > CR \qquad h = (h_0 + B/A)\, e^{At} - B/A$$

$$\text{Pour } h < CR \qquad h' = (h'_0 + B'/A')\, e^{A't} - B'/A'$$

Remarquons en outre que l'expression (VI) montre que l'humidité h tend vers une limite lorsque t s'accroît indéfiniment : il y a donc une valeur asymptotique, donnée par — B/A. On est donc amené à penser qu'un type de transfert conduit à une humidité minima limite. Lorsqu'on se trouve dans la phase initiale du ressuyage, et que l'humidité approche de la capacité de rétention, la valeur asymptotique n'apparaît pas, car un deuxième régime de transfert prend le relai du premier. Par contre dans les faibles humidités, une telle valeur asymptotique semble devoir marquer la limite réelle du ressuyage, ou du transfert en phase liquide.

On peut déterminer cette valeur asymptotique — B/A en calculant, d'après les données expérimentales, la droite (III) (basses humidités). On peut en avoir une idée approchée si on songe que cette valeur — B/A est en fait l'abscisse de l'intersection de la droite (III) (tracée approximtivement) avec l'axe des h (pour $\Delta h/\Delta t = 0$). L'examen des figures 12 à 21 montre qu'effectivement il y a intersection pour des faibles valeurs de l'humidité correspondant peut-être au point de flétrissement permanent (notamment fig. 12, 17, 19, 20, 21). Cette hypothèse reste à vérifier.

Pour deux des sols étudiés (Grimari 15-30 et Closeaux 50) nous avons calculé les coefficients A et B respectivement pour les deux droites (III). Cela nous permet donc pour chacun de ces sols d'écrire les deux fonctions exponentielles (VI).

		A	B	—B/A
Grimari	1re phase ($h >$ CR)	— 0,77	18,07	23,46
	2e phase ($h <$ CR)	— 0,039	0,44	11,28
Closeaux	1re phase ($h >$ CR)	— 0,204	3,80	18,63
(50)	2e phase ($h <$ CR)	— 0,014	0,14	10,00

Pour tracer les courbes représentatives de (VI), il convient de connaître C, c'est-à-dire h_0. Pour la première phase du ressuyage, nous avons été tenté de prendre pour h_0 l'humidité réelle de l'échantillon au temps 0 : cela nous a conduit à des valeurs

[1] A l'exception de Closeaux 15,25 où le graphique en humidité moyenne (fig. 16) suggère une courbe exponentielle, alors qu'en humidité minima on obtient deux droites. Font partiellement exception les deux sols sableux (fig. 20 et 21) où la droite du ressuyage rapide n'est pas nette.

calculées de h trop élevées. Nous avons réduit l'écart en réduisant empiriquement la valeur de h_0, moyennant quoi on obtient une très fidèle représentation du phénomène par la formule (fig. 22 et 24) sauf à l'origine.

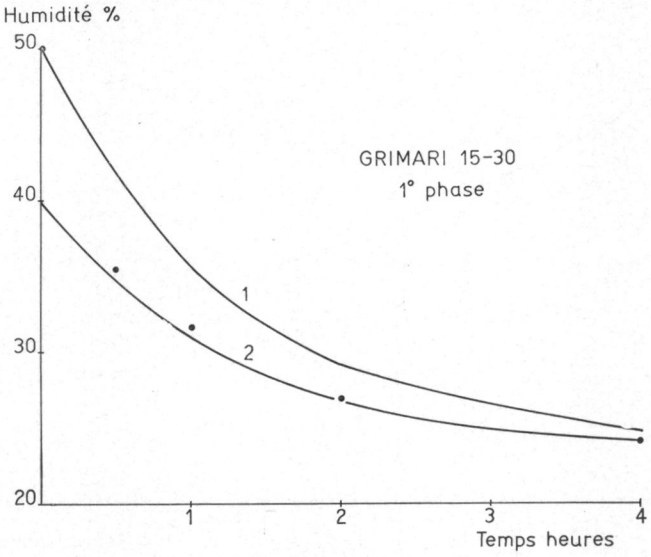


FIG. 22

Courbe 1 : exponentielle, avec $h_0 = 50$
Courbe 2 : exponentielle, avec $h_0 = 40$
Points expérimentaux

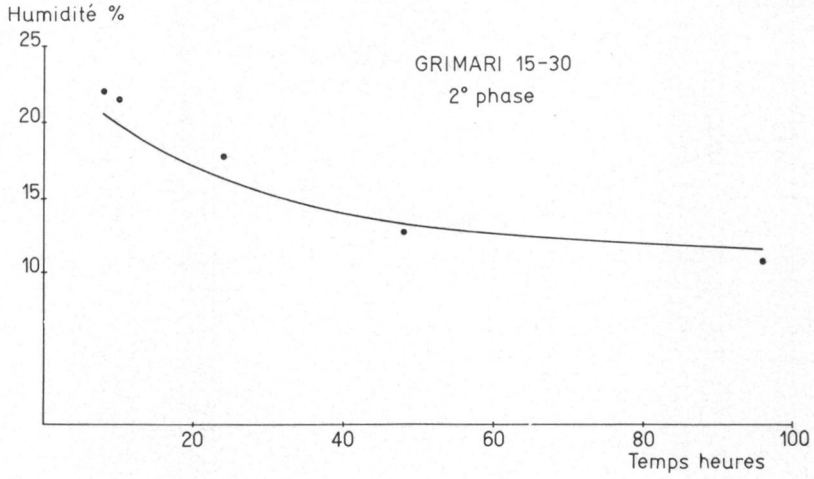


FIG. 23.

Courbe exponentielle, avec $h_0 = 24$
Points expérimentaux

Pour la deuxième phase (en dessous de la capacité de rétention) nous avons pris pour h_0 la valeur même de la capacité de rétention. La description du phénomène est alors très satisfaisante (fig. 23 et 25).

La représentation en logt, précédemment employée, n'est en fin de compte qu'une façon commode de disposer les résultats d'un essai, mais ne permet pas

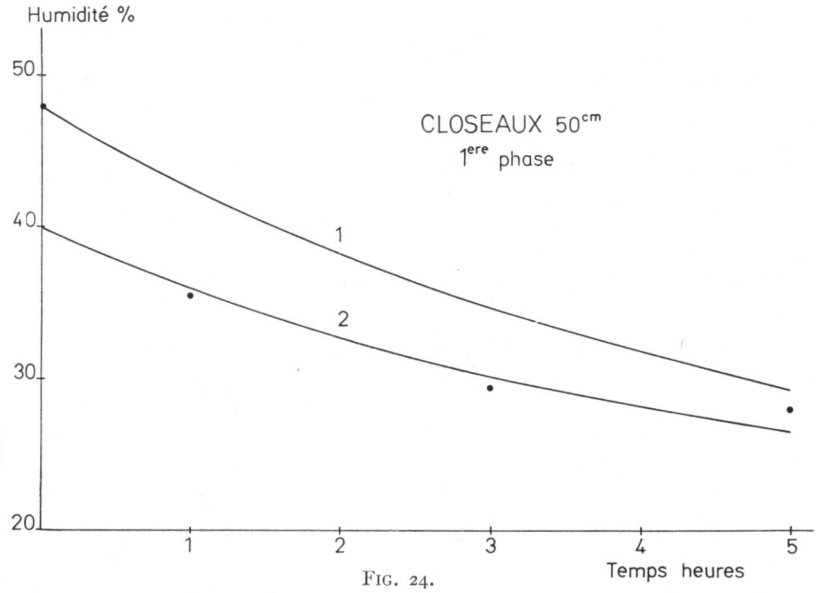


FIG. 24.

Courbe 1 : exponentielle avec $h_0 = 48$
Courbe 2 : exponentielle avec $h_0 = 40$
Points expérimentaux

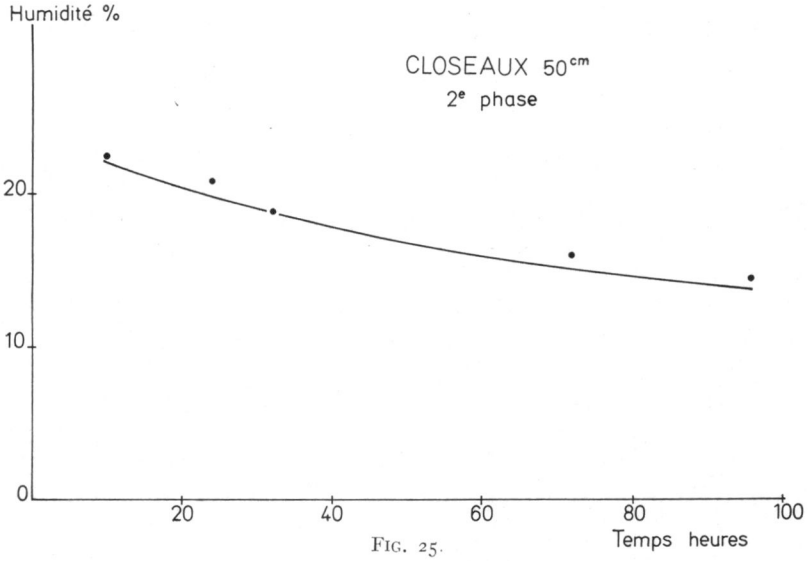


FIG. 25.

Courbe exponentielle avec $h_0 = 24$
Points expérimentaux

d'en tirer toutes les informations souhaitables. La formule d'OGATA et RICHARDS (1) comporte les inconvénients de la forme logarithmique, et est, en plus, d'un manie-

ment difficile. En fait la représentation directe de h en fonction de t ne présente qu'un intérêt mineur car elle manque de sensibilité, du fait même qu'on arrive toujours à ajuster des fonctions mathématiques, même assez différentes, sur les données expérimentales couvrant une large gamme d'humidité.

Nous pensons donc que pour tirer le maximum de renseignements des données expérimentales, la meilleure solution consiste encore à représenter les résultats en $\Delta h/\Delta t = f(h)$: cette façon d'opérer permet de mettre très nettement en évidence la discontinuité dans le régime de transfert de l'eau et, donc la valeur de la capacité de rétention. Elle nous donne les valeurs des coefficients A et B, et donc les valeurs asymptotiques de h ($-$ B/A). Il n'est pas exclu qu'on puisse en tirer d'autres renseignements.

IV. — CONCLUSIONS

Des essais faits au champ ainsi qu'au laboratoire montrent que le ressuyage d'un sol est un phénomène illimité, qui va en se ralentissant avec le temps. Dans ces conditions la grandeur qu'il est convenu d'appeler la capacité de rétention ne peut pas correspondre à un arrêt complet du ressuyage et donc à un équilibre statique.

Nos essais au laboratoire indiquent que le ressuyage initial est rapide, puis, lorsque l'humidité du sol atteint une certaine valeur, il change d'allure. C'est cette valeur de l'humidité que nous avons comparée aux valeurs respectives de la capacité au champ pour une gamme de sols, et nous avons constaté un accord très convenable. Nous pensons que cette concordance justifie notre méthode de détermination de la capacité de rétention, à condition que l'accord constaté entre les valeurs au champ et au laboratoire se vérifie sur une plus grand nombre de sols.

Des deux techniques de laboratoire décrites, celle qui rendrait les meilleurs services est la méthode indirecte (ressuyage sur terre sèche) car elle est la plus rapide, permet de couvrir plus facilement une gamme importante d'humidité et d'encadrer ainsi la valeur de la « capacité de rétention » avec un nombre de points suffisants. Si son inconvénient majeur est de requérir une quantité de terre assez importante, elle a l'avantage important de donner une valeur de la rétention qui rejoint la capacité au champ, sans faire d'hypothèse sur la nature et la grandeur des forces physiques en cause.

Reçu pour publication en juin 1962

SUMMARY

THE DRAINAGE OF SOIL WATER AND CAPACITY OF RETENTION

Studies on the capacity of retention on the one hand, and the dynamics of water and phenomena of drainage on the other are often very contradictory : the dynamics of water have for some time been regarded as a continual process over the entire moisture range (which means the total negation of the concept of the capacity of retention), while other regard the capacity of retention as a static value.

The laboratory experiments performed (evolution of moisture profiles, drainage of soil) clearly showed that when a soil initially saturated with water was subjected to drainage, its moisture content decreased well below the capacity of retention. Expressing the moisture (h) as a logarithmic function of time (t) leads sometimes to several lines and sometimes to one straight line ; in the latter case the moisture does not possess any characteristic or particular value.

When considering, on the other hand, the rate of drainage of the soil, by calculating the positive values of $\Delta h/\Delta t$ for different intervals, and plotting the value obtained on a graph where the average moisture of the interval appears on the abscis, two straight lines intersecting at a certain value of moisture are obtained. This value shows a good correlation with the moisture content at field capacity. The field capacity or specific capacity of retention may thus be determined in the laboratory.

It is also shown that the characterisation of a process of drainage theoretically requires to exponential expressions $h = f(t)$ with distinct parameters, one to be applied below the capacity of retention and the other above.

It is concluded that the capacity of water retention of a soil may be regarded as a dynamic notion, being the moisture content at the limits of two different regimes of moisture transfer ; it can be determined in the laboratory by the two experimental procedures described.

ZUSAMMENFASSUNG

VERSICKERUNG UND WASSERKAPAZITÄT

Die Untersuchungen über Wasserkapazität einerseits, Wasserdynamik und Versickerung serscheinungen andrerseits sind oft widersprechend : seit einiger Zeit wird die Wasserdynamik als eine fortwährende Erscheinung in der gesamten Feuchtigkeitsskala behandelt (was manche dazuführt, den Begriff der Wasserkapazität zu verneinen, während andere Autoren diese Kapazität als statische Grösse betrachten).

Unsere Laborversuche (Evolution der Wasserprofile, Versickerung auf trockener Erde) zeigen tatsächlich, dass die Feuchtigkeit eines anfänglich mit Wasser gesättigten und der Versickerung unterworfenen Bodens weit unter die Wasserkapazität heruntersinkt. Wird die Feuchtigktei (h) nach dem log der Zeit (t) ausgedrückt, so erhält man manchmal mehrere, manchmal nur eine Gerade. Im letzteren Falle erscheint keine charakteristische oder besondere Feuchtigkeitsgrösse.

Wenn man jedoch den Rythmus der Versickerung betrachtet, und für die Zeitabstände den positiven Wert $\Delta h/\Delta t$ berechnet, ihn graphisch mit der Durschschnittsfeuchtigkeit für die Zeitspanne in Abszisse einsetzt so ergeben sich zwei Gerade, die sich für einen bestimmten Feuchtigkeitswert schneiden. Vergleicht man diesen Feuchtigkeitswert mit der Kapazität im Felde, so ergibt sich eine gute Übereinstimmung. Auf diese Art konnte die Kapazität im Felde auch spezifische Bindungskapazität genannt, im Labor ermittelt werden. Man ersieht ausserderm, dass, um eine Abtrocknungserscheinung zu beschreiben, man theoretisch zwei Exponentiale $n = f$ (+ mit verschiedenen Parametern benötigen würde, die eine anwendbar über, die andere unter der Bindungskapazität.

So wird die Wasserbindungskapazität eines Bodens in ein dynamisches Ganzes gestellt : es ist die an der Grenze zweier verschiedener Wasserübergänge gelegene Feuchtigkeit.

In unserer Mitteilung werden zwei verschiedene Experimentalvorrichtungen beschrieben, die eine Bestimmung im Labor ermöglichen.

Отсасывание влаги и влагоемкость почвы.

Александр ФЕОДОРОВ (Версаль).

Исследования влагоемкости с одной стороны, динамики влажности и процессов стекания с другой, бывают часто противоречивыми : с некоторых пор динамика влажности рассматривается как явление плавное для всей гаммы влажностей (что приводит некоторых к отрицанию даже самого понятия влагоемкости) в то время как другие авторы рассматривают влагоемкость как величину статическую. Наши лабораторные опыты (эволюция профилей влаги, отсасывание влаги сухой почвой) показывают что влажность почвы сначала избыточно увлажненной и предоставленной затем отсасыванию, действительно опускается гораздо ниже ее влагоемкости. Выражая влажность h в зависимости от логарифма времени t можно получить иногда несколько, а иногда одну только прямую. В последнем случае не выявляется никакого характерного или особого значения влажности.

Однако, если принять во внимание ритм стекания почвенной влаги, исчисляя на интервалы времени положительную величину $\Delta h/\Delta t$, и перенести эту величину на график где средняя влажность интервалла будет отложена на абсциссе, то можно отметить что получатся две прямые, пересекающиеся на уровне некоторой величины влажности. Сравнивая эту величину влажности с полевой влагоемкостью можно отметить очень хорошую согласованность. Таким образом можно лабораторным способом определить полевую влагоемкость или специфическую влагоемкость почв.

Описание явления отсасывания требует теоротически двух экспоненциальных уравнений $h = f(t)$ с различными параметрами; одно — применяется при влажностях выше полевой влагоемкости, другое — при влажностях ниже.

Таким образом Влагоемкость почвы снова перемещается в контекст динамики влажности : она представляет из себя влажность стоящую на границе двух различных режимов переноса влаги. В настоящей статье описаны два разных способа ее определения в лаборатории.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BURROW W. C., KIRKHAM Don 1958. Measurement of field capacity with a neutron-meter. *Soil. Sci. Soc. Amer. Proc.*, **22**, 103-105.

DOLGOV S. I., 1948. Recherches sur les mouvements de l'eau du sol et son accessibilité aux plantes (en russe). Ed. Ac. Sc. U. R. S. S. Moscou-Leningrad, 79-87

EDELFSEN, BODMAN, 1941. Field measurement of water movement through a silt loam soil. *J. Amer. Soc. Agron.*, **33**, 713-731.

MARSHAL T. J., STIRK G. B., 1949. Pressure potentiel of water moving downward into soil. *Soil Sci.*, **68**, 359-370.

OGATA G., RICHARDS L. A., 1957. Water content changes following irrigation of bare-field soil that is protected from evaporation. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **21**, 535-536.

ORECHKINA N. S., 1959. Essais pour l'étude de la rétention de l'eau par les fractions de sable fin et de limon grossier (en russe). *Pochvovedenie*, nº 1, 79-85.

STAPLE W. J., LEHANE J. J., 1954. Movement of moisture in unsaturated soils. *Canad. J. Agric. Sci.*, **34**, 329-342.

RICHARDS L. A., MOORE D. C., 1952. Influence of capillary conductivity and depth of wetting on moisture retention in soil. *Trans. Amer. Geoph. Union*, **33**, 531-540.

RODE A., 1960. Méthodes d'étude du régime hydrique des sols (en russe). Ed. Ac. Sc. U. R. S. S. Moscou 154-161.

Ann. agron., 1962, **13** (6), 549-574

631. 828 : 546. 22

ÉTUDES SUR L'EMPLOI DU SOUFRE ÉLÉMENTAIRE COMME FERTILISANT DU SOL

Ginette SIMON-SYLVESTRE et P. BOISCHOT

avec la collaboration technique de N. COMY A. NETILLARD et R. STUDER,

Station centrale d'Agronomie,

Centre national de Recherches agronomiques, Versailles (Seine-et-Oise)

SOMMAIRE

Ces études préliminaires au laboratoire sont destinées à donner quelques renseignements sur les conséquences éventuelles de l'emploi du soufre élémentaire comme fertilisant du sol.

Il s'agit là d'expériences soit chimico-agricoles (influence sur le pH, sur l'azote minéral des sols, et sur la composition des eaux de drainage), soit microbiologiques (influence sur la vie microbienne des sols et sur l'activité de différents groupes de microorganismes).

INTRODUCTION

Jusqu'à ces dernières années, on ne se précocupait pas de restituer au sol le soufre exporté par les récoltes. On supposait que les quantités de cet élément apportées par les eaux de pluies, les engrais sulfatés (sulfates d'ammonium et de potassium, superphosphate, etc,) et le fumier de ferme étaient suffisantes pour assurer l'alimentation soufrée des plantes.

Il n'en est plus de même aujourd'hui. L'emploi des engrais non sulfatés (ammonitrate, scories, etc.) la diminution des apports de fumier de ferme et aussi l'augmentation des exportations, due aux forts rendements, obligent l'agronome à envisager la fertilisation sulfatée des sols.

On peut employer à cet effet le sulfate de chaux dont il existe des gisements importants un peu partout.

Mais depuis quelques années, l'apparition sur le marché de grandes quantités de soufre élémentaire provenant de l'épuration des gaz naturels, met à la disposition de l'agriculteur une source de soufre, ne contenant pas d'éléments secondaires, ce qui diminue les frais de transport.

Il est donc intéressant de connaître quelles conséquences peut avoir l'emploi direct du soufre en agriculture en dehors de son action anticryptogamique et de son rôle fertilisant proprement dit.

Nous avons entrepris quelques recherches sur ce sujet. C'est une partie des résultats obtenus que nous publions dans le présent mémoire.

Il s'agit là d'études préliminaires qui demandent a être poursuivies au champ de façon à nous rendre compte dans quelles mesures les résultats obtenus au laboratoire et dans les cultures en pots peuvent être interpolés en culture normale.

I. — INFLUENCE DES APPORTS DE SOUFRE SUR LA RÉACTION DU SOL

1° En sol nu

Technique

Les terres étaient mises dans une étuve à 28° à l'intérieur de laquelle on entretenait une atmosphère humide à l'aide de cristallisoirs remplis d'eau.

Les terres ont été mélangées avec des quantités de soufre finement pulvérisé correspondant à : 0, 100, 250 et 1 000 kg de soufre à l'hectare. Chaque terre était amenée à sa demi-capacité de saturation en eau, laquelle a été maintenue pendant toute l'expérience.

Les mesures de pH ont été faites à l'électrode de verre et à l'eau (le rapport terre/eau étant égal à 1/2).

Résultats

Les résultats sont indiqués sur les graphiques ci-contre.

Nous n'avons tracé que les courbes 0 et 1 000 kg de S, les autres correspondant aux apports de 100, 250 et 500 kg de S à l'hectare se plaçant entre ces deux extrêmes.

Conclusions

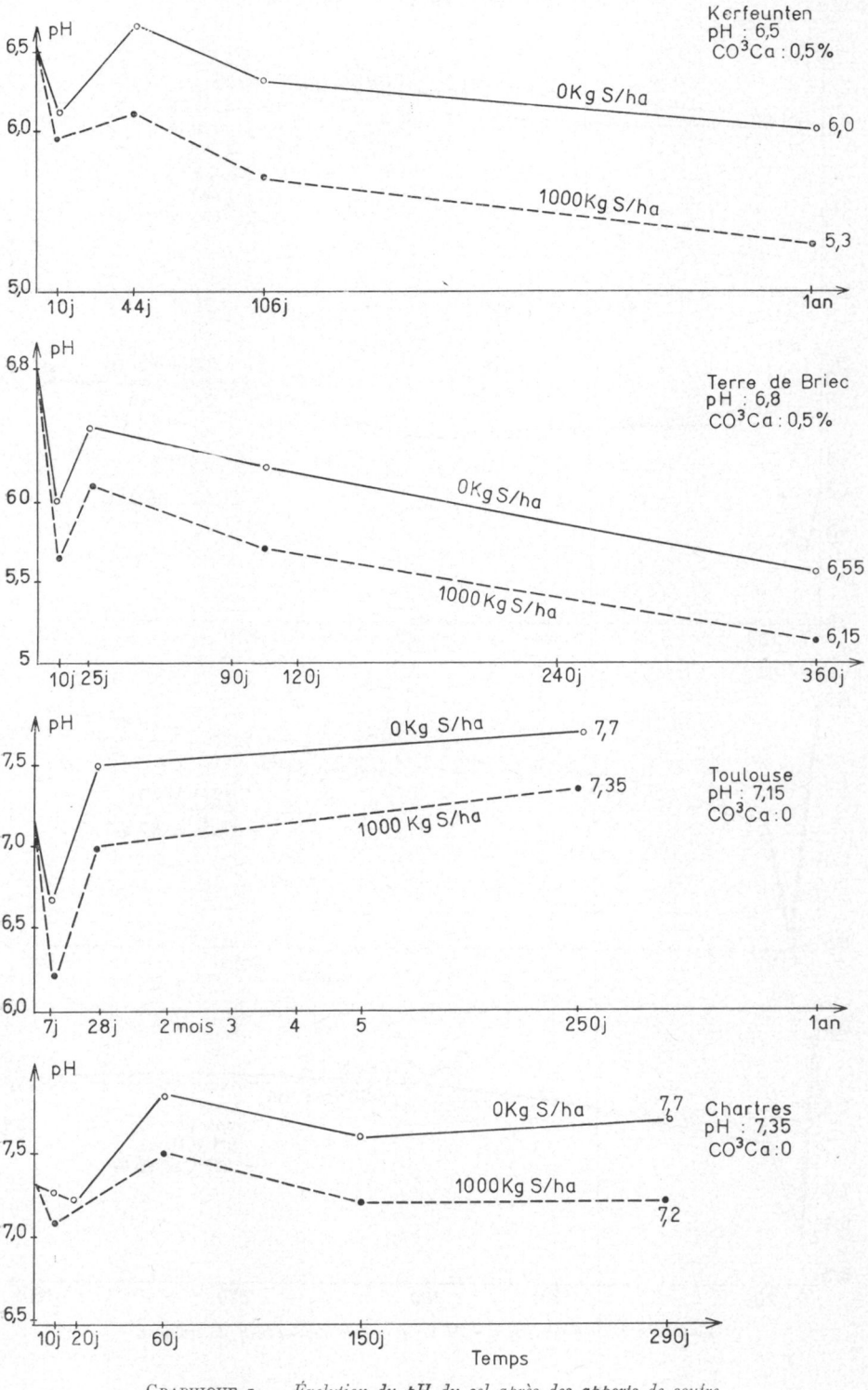
Si nous considérons ces courbes, nous constatons une brusque baisse de pH entre les 8 et 15 premiers jours, qu'il y ait ou non apport de soufre.

Il s'agit là d'un effet dû à une augmentation de la nitrification. Des observations analogues s'observent d'ailleurs dans la nature au cours d'une année : existence d'un maximum en novembre-décembre, par suite d'une diminution de la production d'électrolytes par voie biologique et d'un lessivage des sols par les pluies, et d'un minimum en juillet-août quand la concentration d'électrolytes est élevée. Dans nos essais, la terre étant mise dans des conditions favorables de température et d'humidité, l'activité des microorganismes augmente, notamment celle des nitrificateurs, et il s'ensuit un accroissement d'électrolytes et une baisse de pH. Après le 15e jour, les courbes présentent des ondulations dues à des variations d'électrolytes de la terre au cours du temps.

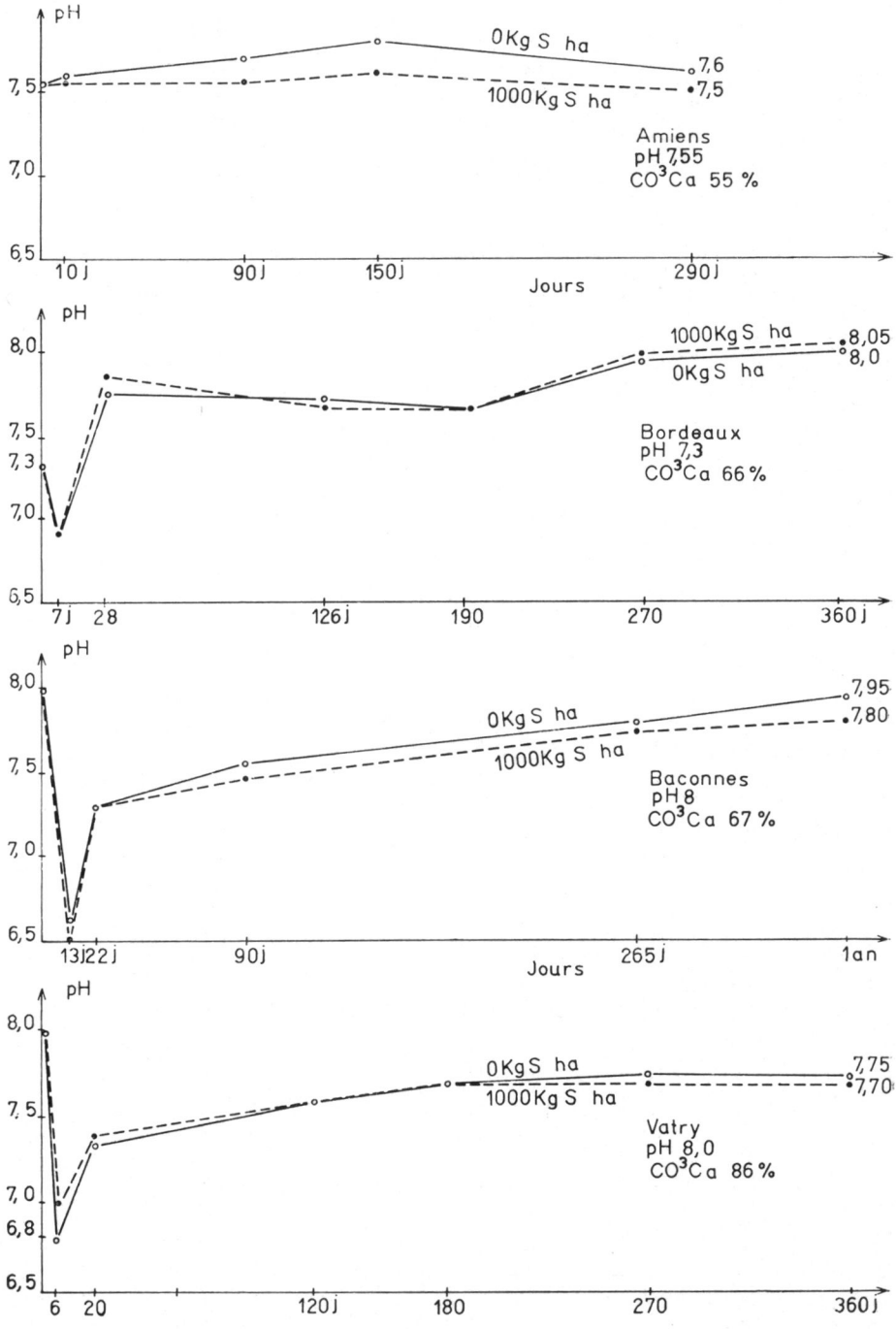
A part ces variations qui sont indépendantes de l'apport de soufre, nous voyons que les terres se comportent de deux façons différentes suivant qu'il s'agit :

1) de terres calcaires ;

2) de terres acides ou contenant très peu de CO_3Ca.



GRAPHIQUE 1 — *Évolution du pH du sol après des apports de soufre*



GRAPHIQUE 2 — *Évolution du pH du sol après des apports de soufre*

Pour les terres calcaires (Vatry, Baconnes, Bordeaux, Amiens) les apports de soufre ont une influence nulle sur le pH, le CO_3Ca neutralisant immédiatement l'acidité due à l'oxydation du soufre.

Par contre, pour des sols non calcaires le pH décroît d'autant plus que les quantités de soufre apportées sont plus fortes. C'est le cas des terres de Toulouse II, de Chartres et surtout de Bretagne (Briec et Kerfeunteun) qui sont légèrement acides. Les écarts entre le témoin et la plus forte dose de soufre atteignent 0,4 unité pH pour les terres de Toulouse et Chartres et 0,7-0,8 pour les terres de Bretagne. Dans ces sols, les apports de soufre ont donc un effet très net sur le pH. Cette évolution du pH est rapide : souvent en moins d'un mois des différences très nettes sont apparues, ce qui prouve que l'oxydation du soufre dans le sol s'effectue en peu de temps (graphique 1 et 2).

2° En sol cultivé (culture en pots)

L'expérience a porté sur les mêmes terres, que nous avons enrichies en soufre (100, 250, 500 et 1 000 kg à l'ha).

Technique

Les essais ont été effectués en mars, en serre chauffée, dans des pots en plastique, pouvant contenir 2 kg de terre sèche. Afin de faciliter le drainage, le fond du pot est rempli de cailloux et perforé. La capacité de rétention de chaque terre a été déterminée. Les arrosages sont faits tous les jours sans excès.

S'il y a surplus d'eau, il s'écoule, est recueilli dans une soucoupe et sert aux arrosages ultérieurs.

Chaque pot a reçu une fumure de fond (100 N, 80 P_2O_5, 150 K_2O à l'hectare) en solution préparée à partir de phosphate monopotassique, de nitrate de potassium et de nitrate d'ammonium.

Nous avons expérimenté le Radis qui est une plante sensible aux apports de soufre, de croissance rapide et printanière (à jours courts).

Le nombre de plantes par pot oscillent entre 27 et 29, sauf pour Briec où une attaque de *Pythium* en a réduit le nombre.

Résultats

La levée et la croissance ont été normales, la tubérisation par contre s'est mal faite, la différence de température n'étant pas assez importante entre la nuit et le jour.

A l'arrachage, 45 jours après le semis, nous avons pris le pH des sols dans les conditions indiquées précédemment. Nous avons obtenu les résultats suivants :

Évolution du pH *après une culture de radis*

Terres	CO_3Ca %	Kilogs de S à l'hectare			Différence entre 0 et 1 000 kg de S/ha
		0	250	1 000	
Vatry	86	7,5	7,4	7,4	0,1
Baconnes	— 67	7,2	7,3	7,0	0,2
Bordeaux	— 66	7,15	7,0	6,90	0,25
Amiens	— 55	7,5	7,5	7,35	0,15
Chartres	— 0	6,20	6,0	5,75	0.45
Briec	— 0,5	6,05	5,75	5,40	0,65
Kerfeunteun	— 0,5	6,1	6,0	5,6	0,50
Toulouse	— 0	7,85	7,55	7,45	0,40

Conclusions

Ces quelques chiffres confirment les résultats obtenus en sols nus à savoir :

Très petites variations pour les sols calcaires et différences notables pour les terres dépourvues de carbonate de chaux.

Mais, même dans ce dernier cas, les différences pour les quantités de 100 à 250 kg, généralement employées, ne dépassent pas 0,3 unité pH.

Il convient de préciser que les quantités recoltées n'ont aucune action sur la variation du pH. Certes, plus la récolte est importante, plus la quantité de S absorbée est considérable, mais ce soufre a été utilisé après sa neutralisation. C'est ce qui explique que les résultats obtenus sont identiques en sols nus et cultivés.

3° Acidité hydrolytiquue des terres

Parallèlement aux mesures de pH, on a effectué des dosages d'acidité hydrolytique lesquels permettent de connaître la quantité de carbonate de calcium nécessaire pour neutraliser la couche arable.

Technique

La terre est agitée avec de l'acétate de calcium et on titre l'acidité du filtrat avec de la soude décinormale, on peut en déduire la quantité de carbonate de calcium nécessaire pour neutraliser la couche arable (évaluée à 3 000 tonnes).

Résultats

La mesure de l'acidité hydrolytique de ces terres, avec et sans apport de soufre, nous a donné des résultats identiques à ceux obtenus par la mesure de l'évolution du pH.

De ces études nous pouvons tirer la conclusion générale suivante :

Il ne semble pas que l'acidification des sols constitue un obstacle à l'emploi du soufre comme élément fertilisant pour les doses préconisées ordinairement dans la pratique (100 et 250 kg de S à l'ha).

Néanmoins, si on est amené à faire de forts apports de soufre en terre acide, il sera bon d'apporter au sol une certaine quantité de carbonate de chaux pour neutraliser l'acidité due à ces apports.

II. — Influence des apports de soufre sur l'azote minéral des sols

1° Étude chimique

Technique

La terre mélangée au soufre est humidifiée à un taux convenable et laissée des temps variables à l'étuve à 28°.

La méthode de Drouineau a été utilisée pour doser l'azote minéral des sols : elle comprend une extraction avec du chlorure de calcium neutre normal, et une distillation en présence de magnésie seule pour l'azote ammoniacal et en présence de magnésie et d'alliage Dewarda pour la somme : azote ammoniacal + azote nitrique.

Nos expériences ont porté sur une terre franche dite des « Petits Closeaux » et une terre acide « Kerfeunteun ».

Résultats

Les résultats obtenus ont été les suivants :

Quantité d'azote minéral (ammoniacal + nitrique) en kg par hectare (profondeur du sol 30 cm).

« *Petits Closeaux* »

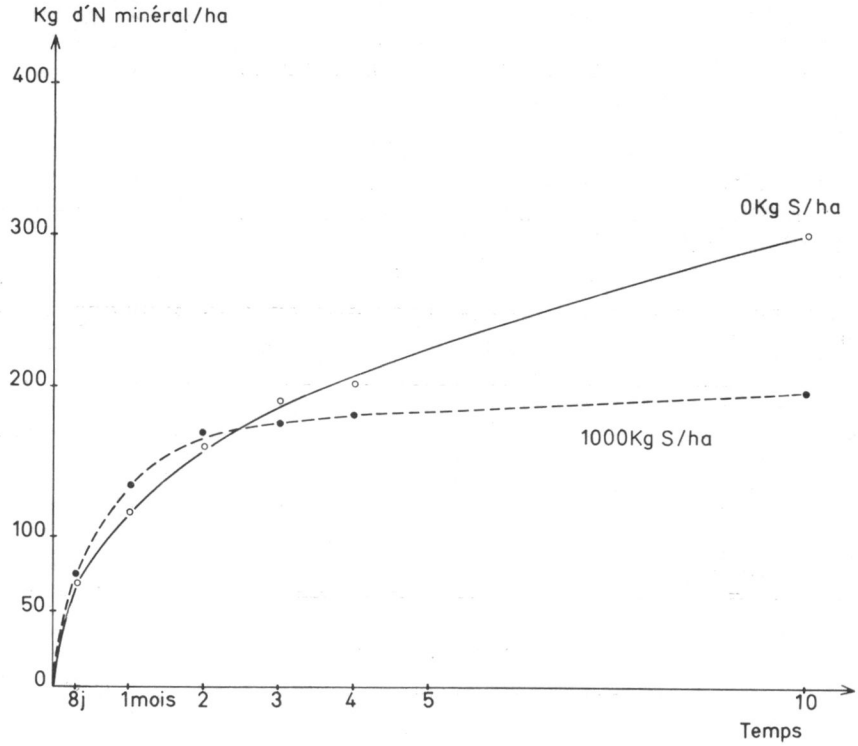
Temps passé à l'étuve à 28°	0 kg S/ha	100 kg S/ha	250 kg S/ha	500 kg S/ha	1 000 kg S/ha
0	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2
8 jours	69,3	61,9	71,4	69,3	73,5
15 jours	75,6	100,8	98,4	100,8	105
1 mois	115,5	111,3	128,1	123,9	136,5
2 —	157,5	141	157,5	165,9	170,1
3 —	189	178,5	174,3	170	174,3
4 —	201,6	193,2	145,8	180,6	180,6
10 mois 1/2.....	299,2	235,2	256,2	247,8	195

Terre de « Kerfeunteun »

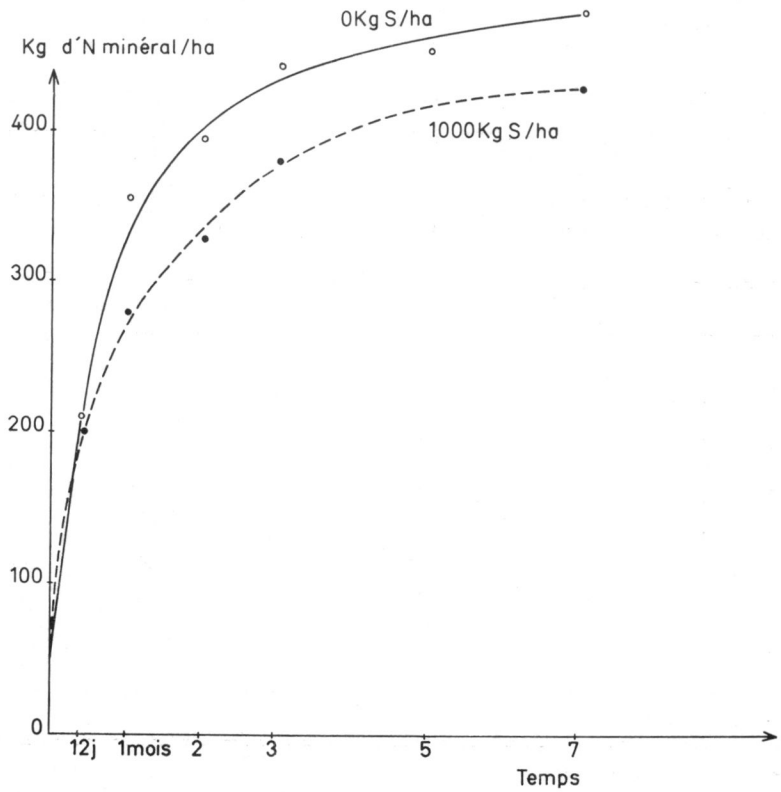
Temps passé à l'étuve à 28°	0 kg S/ha	100 kg S/ha	250 kg S/ha	500 kg S/ha	1 000 kg S/ha
0 jour	54,6	54,6	54,6	54,6	54,6
12 jours	208,0	191,1	195,3	199,5	199,5
1 mois	355,0	312,6	325,5	292,0	277,2
2 —	396	344	342,3	342,3	327,6
3 —	443	414	401	401	380
5 —	453,6	451,5	441	457,8	436,8
7 —	480,9	501,9	473,1	464,1	428,1

Par rapport au témoin sans soufre, égal à 100, nous obtenons les chiffres suivants : pour les différents essais avec soufre

	0 kg S/ha	100 kg S/ha	250 kg S/ha	500 kg S/ha	1 000 kg S/ha
		« *Petits Closeaux* »			
après 8 jours	100	118	103	100	106
15 jours	100	133	130	133	138
1 mois	100	96	110	107	118
2 —	100	89	100	105	107
3 —	100	94	92	—	92
4 —	100	95	72	89	89
10 mois 1/2.....	100	78	85	82	65
		« *Kerfeunteun* »			
12 jours	100	91	94	96	96
1 mois	100	87	91	82	78
2 —	100	87	86	86	81
3 —	100	93	90	90	85
5 —	100	99	97	100	96
7 —	100	104	98	96	89



GRAPHIQUE 3 — *Action des apports de soufre sur la minéralisation de l'azote (Petits Closeaux).*



GRAPHIQUE 4 — *Action des apports de soufre sur la minéralisation de l'azote (Kerfeunten).*

Nous voyons que la minéralisation de la terre de Kerfeunteun est plus considérable que celle des Petits Closeaux car elle possède une réserve organique beaucoup plus grande (0,37 p. 1 000 N total au lieu de 0,22).

Ainsi que le montrent les tableaux et graphiques (3 et 4) l'apport de soufre a eu une influence sur la minéralisation de l'azote organique.

Dans la terre des Petits Closeaux, action favorable du S au départ, puis diminution de l'azote minéralisé. Pour Kerfeunteun, égalité au début entre le témoin et les parcelles traitées, et, après un mois, diminution de la minéralisation.

Conclusion

Au total le soufre retarde nettement la minéralisation de l'azote organique (de 30 p. 100 pour la forte dose.)

2° ÉTUDE MICROBIOLOGIQUE : AMMONIFICATION

Parallèlement à cette étude chimique, nous avons entrepris une étude microbiologique de l'ammonification, chaînon essentiel du cycle de l'azote, intermédiaire entre la dégradation de la matière organique et la nitrification. C'est en somme la première phase de ce qui a été étudié chimiquement puisque la minéralisation de l'azote organique comprend les transformations de N organique en NH_3 et de NH_3 en NO_3.

Technique

Nous ensemençons avec des dilutions de terre (la dilution 10^{-1} est obtenue en réalisant une suspension homogène avec 1 g de terre et 9 cc d'eau stérile : on passe à la dilution 10^{-1} en ajoutant 9 cc d'eau stérile à 1 cc de la dilution 10^{-2}). La source unique de carbone et d'azote est fournie par de l'asparagine. Nous suivons colorimétriquement avec le réactif de NESSLER l'apparition d'ammoniaque formée dans la solution. Les lectures sont faites généralement les 2e, 4e, 10e et 21e jour après l'ensemencement.

D'après la dilution à laquelle apparaît l'ammoniaque, nous pouvons apprécier l'activité biologique de la microflore ammonifiante.

Les essais ont été faits avec cinq terres : Briec, Amiens, Kerfeunteun, Petits Closeaux et Vatry.

Résultats

Les résultats obtenus n'indiquent pas de différence entre les témoins et les terres enrichies en soufre. Il faut donc accorder plus d'importance aux expériences chimiques qu'aux analyses microbiologiques. L'asparagine choisie pour étudier ce groupe de microorganismes n'est peut-être pas représentative de l'azote du sol, et les microorganismes ammonifiants agissent vraisemblablement différemment lorsqu'ils ont affaire à l'humus comme source d'azote organique.

FIFE (1926) trouve une augmentation de l'ammonification en présence de soufre. Mais comme il apporte du sang desséché comme matière azotée, c'est la minéralisation de celui-ci et non celle de la matière organique du sol qu'il observe.

Par contre, d'autres chercheurs LIGON (1935) MAC GEORGE (1935) ont constaté une diminution de la nitrification en présence d'addition de soufre.

Ces études montrent la difficulté des méthodes microbiologiques dans ce domaine, difficulté provenant en grande partie de ce que les matières organiques expérimentées sont de compositions très différentes des matières organiques et de l'humus contenus dans les sols.

Conclusions

Si les expériences microbiologiques ne mettent pas en évidence l'action du soufre sur l'évolution de la matière organique, par contre les expériences chimiques prouvent que *l'apport de soufre diminue la minéralisation de l'azote. Ce phénomène peu important pour les faibles doses peut devenir sensible pour les doses fortes.*

Ce résultat cadre avec ceux obtenus dans des expériences microbiologiques que nous verrons plus loin, indiquant une diminution de la microflore en présence de soufre, puisque nous savons qu'une grande partie de l'azote minéralisable provient des corps microbiens.

Au point de vue agronomique, ce phénomène :

1° N'a pas d'importance dans les sols bien pourvus en matières organiques où la libération de l'azote est toujours suffisante.

2° Est favorable en terre peu humifère les années où les conditions climatiques d'automne sont favorables à la minéralisation (années chaudes et humides) — ce qui peut avoir pour conséquence d'entraîner de fortes pertes en azote nitrique dans les eaux de drainage l'hiver suivant.

3° Peut être défavorable dans le cas où l'hiver et le printemps sont secs et froids, car il limite la quantité d'azote disponible pour les plantes au printemps.

Dans ce cas, il sera bon de forcer les apports d'azote au printemps, si l'on fait des apports de soufre.

Remarque. — La matière organique contient non seulement de l'azote mais du soufre (0,5 à 0,6 p. 100 dans les acides humiques, suivant TROCME).

Donc, toute cause diminuant la minéralisation de l'azote (et par conséquent la destruction de la matière organique) diminue également la minéralisation du soufre, c'est-à-dire sa mise à la disposition des plantes.

Or la quantité de soufre libéré par la matière organique est loin d'être négligeable comme le montre le bilan de 10 ans établi par DEMOLON avec la terre des « Petits Closeaux » en cases lysimétriques de 1 m² de surface :

	(g)
Soufre minéral préexistant dans le sol (par case)	93,6
Soufre apporté par les pluies	9,8
Soufre apporté par les engrais (néant)	
Total	103,4
Soufre dosé dans le sol, après 10 ans	50,4
Pertes apparentes	53,0
Soufre entraîné par les eaux de drainage	68,3
Soufre exporté par les récoltes	13,5
Total	81,8

La différence 81,8–53,0 = 28,8 g ne peut donc avoir été fournie que par la matière organique du sol. C'est donc une quantité de l'ordre de 288 kg en 10 ans, soit 28,8 kg par an et par ha de soufre qui a été libérée par la destruction de la matière organique.

Nous donnons ces chiffres uniquement pour montrer l'importance du soufre organique.

Il est bien évident que la diminution de la minéralisation du *soufre organique* par l'apport de *soufre minéral* n'à aucune importance pratique.

Dans les exemples cités, même en admettant une diminution de 30 p. 100 dans la destruction de la matière organique par l'apport de soufre, nous n'aurions jamais qu'un blocage de 8,64 kg de soufre organique occasionné par un apport de 1 000 kg de S ce qui est insignifiant.

III. — INFLUENCE DES APPORTS DE SOUFRE SUR LA COMPOSITION DES EAUX DE DRAINAGE ET SUR LA PERTE D'ÉLÉMENTS

Technique

La terre humidifiée additionnée de doses variables de soufre pulvérisé a été mise à l'étuve à 28°, l'humidité étant maintenue constante.

Après des temps plus ou moins longs, la terre ainsi traitée a été mise dans des allonges et arrosée avec une quantité d'eau équivalente à une pluie annuelle de 650 mm (soit 5 fois 100 cm³).

Dans nos expériences, les allonges avaient 3 cm de diamètre et étaient remplies avec 150 g de terre donnant une hauteur voisine de celle de la couche arable.

La percolation se faisait goutte à goutte, le percolat était recueilli 100 cm³ par 100 cm³, et les 5 prélèvements analysés séparément afin de pouvoir noter la vitesse d'élimination des éléments fertilisants.

Les essais ont été faits avec la terre calcaire des « Petits Closeaux » et la terre acide de Kerfeunteun.

1° Drainage du potassium

Le potassium a été dosé au photomètre de flamme.

Terre des Petits Closeaux (K *échangeable* 0,27 *p.* 1 000)

Jours à 28°	S kg/ha	Potassium drainé (en γ pour 150 g terre)						K drainé (kg/ha)
		Percolations					Total drainé p. 150 g de terre	
		1re	2e	3e	4e	5e		
0	0	860	610	620	570	590	3 250	65
20	0	970	640	600	550	550	3 310	66,2
	100	1 010	640	620	570	580	3 420	68,4
	250	1 060	640	620	570	580	3 470	69,4
	500	1 180	640	620	550	580	3 570	71,4
	1 000	1 320	700	620	600	600	3 840	76,8
48	0	1 030	560	520	580	560	3 250	65
	100	1 060	540	540	540	560	3 240	64,8
	250	1 170	540	540	560	560	3 370	67,4
	500	1 300	580	520	540	560	3 500	70
	1 000	1 520	630	520	540	540	3 750	75
80	0	1 480	720	620	600	580	4 000	80
	100	1 330	640	620	580	580	3 750	75
	250	1 430	670	580	580	520	3 780	75,6
	500	1 640	620	580	580	520	3 940	78,8
	1 000	1 840	720	670	600	580	4 410	88,2
132	0	1 450	570	570	530	530	3 650	73
	100	1 570	570	570	500	530	3 740	74,8
	250	1 580	640	530	500	500	3 750	75
	500	1 710	640	570	500	500	3 920	78,4
	1 000	1 730	740	480	500	480	3 930	78,6

Terre de Kerfeunteun (K *assimilable* 0,29 *p.* 1 000)

Jours à 28°	S g/kha	K drainé (en γ pour 150 g de terre)						K drainé (kg/ha)
		Percolations						
		1re	2e	3e	4e	5e	Total	
0	0	2 020	1 525	1 300	1 320	1 170	7 335	146,7
21	0	2 780	710	620	500	500	5 110	102,2
	100	2 910	820	790	680	670	5 870	117,4
	250	2 970	890	650	580	600	5 690	113,8
	500	2 970	890	700	680	630	5 870	117,4
	1 000	3 460	1 250	930	950	860	7 450	149,0
47	0	3 120	600	530	480	480	5 210	104,2
	100	3 220	770	690	770	690	6 140	122,8
	250	3 700	670	610	480	560	6 020	120,4
	500	4 100	810	580	480	500	6 470	129,4
	1 000	4 560	1 970	1 000	660	560	8 750	175
82	0	3 432	680	540	460	430	5 542	110,8
	100	3 480	1 166	590	550	620	6 406	128
	250	4 026	1 000	530	460	430	6 448	129
	500	4 488	1 360	550	460	410	7 268	153
	1 000	5 040	1 800	750	500	460	8 550	171
132	0	3 498	740	520	500	440	5 698	114
	100	3 700	740	500	500	440	5 886	117
	250	5 202	—	540	460	440	—	
	500	4 340	1 080	520	500	400	6 840	137
	1 000	5 588	1 180	680	520	400	8 368	167

Conclusions

1° Les pertes par eau de drainage augmentent avec les quantités de soufre apporté.

2° Elles augmentent également suivant la durée de contact à 28° entre la terre et le soufre.

3° Dans tous les cas l'augmentation des pertes se constate dès la 1re percolation.

En ce qui concerne la terre calcaire des « Petits Closeaux » :

4° Pour les 2e, 3e, 4e et 5e percolations, on constate :

a) que les quantités de potasse entraînées sont constantes dans chaque série de percolation quelle que soit la quantité de soufre apporté ;

b) que les quantités de potasse entraînées sont les mêmes dans les 2e, 4e et 5e percolations.

En ce qui concerne la terre acide de « Kerfeunteun » :

5° Contrairement à ce qui se passe pour la terre précédente cette influence du S se manifeste dans toute la série de percolations.

Au point de vue agronomique, ces quelques observations nous prouvent :

1° L'appauvrissement de la couche superficielle en potasse lorsqu'on apporte du soufre au sol. Cette perte peut être notable en cas de forte pluviosité car la potasse peut être entraînée dans le sous-sol par les eaux de drainage. Par contre, pour de faibles pluviosités, il y a, non pas perte, mais enrichissement des horizons inférieurs

ce qui peut être bénéfique pour les plantes à racines profondes (betteraves, luzerne).

2° L'entraînement de la potasse augmente avec le temps, mais ce phénomène n'est pas dû à l'apport du soufre puisqu'il se produit également avec la dose 0.

3° La potasse libérée par l'action du soufre est entraînée dès les premiers drainages. En période de non-drainage (si les pluies sont faibles), elle reste à la disposition de la plante.

4° Dans les plus mauvaises conditions, c'est-à-dire drainage complet, l'augmentation des pertes dues aux apports de S sont de l'ordre de 10 /kg ha, ce qui est relativement minime et peut être compensé à peu de frais en forçant les doses d'engrais potassiques.

2° Drainage de l'acide phosphorique

La même expérience a été faite pour l'acide phosphorique, celui-ci étant dosé colorimétriquement suivant la méthode de Zinzadze.

On sait que l'acide phosphorique est retenu énergiquement par le pouvoir absorbant du sol.

Terre des « Petits Closeaux »

Dans cette terre, pauvre d'ailleurs en acide phosphorique assimilable, nous n'avons constaté aucune perte dans les eaux de drainage quels que soient le temps de contact et les quantités de soufre apportées.

Terre de « Kerfeunteun »

Jours à 28°	S kg/ha	P_2O_5 drainé (en γ pour 150 g de terre)						P_2O_5 drainé (kg/ha)
		Percolations						
		1re	2e	3e	4e	5e	Total	
0	0	28	46	92	113	113	392	7,8
21	0	72	159	192,5	209	207,5	840	16,8
	100	68,5	136,5	167,5	153,5	169	695	13,9
	250	72	122,5	187,5	184	187,5	753,5	15,6
	500	63,5	124	169	162,5	173	692	13,8
	1 000	64	116,5	133	153,5	150,5	617,5	12,3
47	0	107	222	304	350	258	1 241	24,8
	100	88	180	172	210	206	856	17,2
	250	99	189	250	284	254	1 076	21,5
	500	99	172	262	306	310	1 149	23
	1 000	101	131	184	222	234	872	17,4
82	0	105	225	279	288	277	1 174	23,4
	100	86	135	184	200	218	823	16,4
	250	105	146	231	262	263	1 007	20,1
	500	120	97	191	224	244	876	17,5
	1 000	113	118	140	195	221	787	15,7
132	0	105	—	270	286	274	—	
	100	124	215	248	274	260	1 121	22,4
	250	142	157	246	292	276	1 113	22,2
	500	127	152	200	242	242	963	19,2
	1 000	142	233	148	190	234	947	18,9

Conclusions

Dans les terres bien pourvues en carbonate de chaux, l'apport de soufre n'a aucune action sur la descente de l'acide phosphorique dans le sol et son passage dans les eaux de drainage.

Dans la terre acide de Kerfeunteun, le séjour à l'étuve a pour conséquence de libérer une certaine partie de P_2O_5 ce qui est normal dans cette terre riche en matière organique. Mais l'apport de soufre a pour conséquence de bloquer une partie de cet acide phosphorique libéré. Ceci provient de l'acidification due au soufre qui favorise la formation de phosphates de fer et d'alumine insolubles.

3° Drainage du calcium

Le calcium et le magnésium sont dosés par la méthode aux complexones, le calcium en présence de murexide et la somme de calcium + magnésium en présence de noir ériochrome. Le magnésium est obtenu par différence.

(Voir résultats dans le tableau suivant.)

Terre des Petits Closeaux (5 *p.* 100 *de* CO_3Ca)

Jours à 28°	S (kg/ha)	Calcium drainé (en mg pour 150 g de terre)						Ca drainé (kg/ha)
		Percolations						
		1er	2e	3e	4e	5e	Total	
0	0	8,9	4,9	4,3	3,55	3,35	25,00	500
20	0	8,1	2,97	2,57	2,47	2,37	19,29	385,8
	100	10,29	3,26	2,77	2,57	2,67	21,56	431,2
	250	12,27	3,16	2,77	2,67	2,67	23,54	470,8
	500	12,84	3,16	3,16	2,87	2,77	27,80	556
	1 000	23,36	4,35	3,16	3,26	3,26	37,39	747,8
48	0	11,68	2,97	2,57	2,77	2,37	22,36	447,2
	100	14,65	2,97	2,77	2,57	2,37	25,33	506,6
	250	19,8	2,97	2,77	2,87	2,37	30,78	615,6
	500	28,9	3,16	2,57	2,77	2,57	39,97	799,4
	1 000	45,54	4,35	2,77	2,77	2,57	58,0	1 160
80	0	17,0	4,0	2,8	2,8	2,8	29,4	588
	100	19,0	3,4	3,0	2,8	2,6	30,8	616
	250	24,0	3,6	2,8	2,8	2,6	35,8	716
	500	35,4	3,4	3,0	2,8	2,6	47,2	946
	1 000	48,0	4,6	3,6	3,4	3,2	62,8	1 256
132	0	30,55	3,74	3,25	2,56	2,56	42,66	853,2
	100	33,37	3,74	2,75	2,36	2,56	44,78	895,6
	250	39,0	4,33	2,56	2,36	2,56	50,81	1 016
	500	50,49	4,72	2,95	2,16	2,75	63,07	1 261
	1 000	62,62	8,07	3,15	2,56	2,56	78,96	1 579,2

Terre de Kerfeunteun

Jours à 28°	S kg/ha	Ca drainé (en mg pour 150 g de terre)						Ca drainé (kg/ha)
		Percolations en mg						
		1er	2e	3e	4e	5e	Total	
0	0	9,22	3,67	2,82	2,67	2,31	20,69	413,8
21	0	18,13	1,81	1,91	1,1	1,0	23,95	479
	100	19,54	2,01	2,31	1,61	1,51	26,98	539,6
	250	20,35	2,31	1,41	1,21	1,21	26,49	529,8
	500	22,56	2,31	1,41	1,41	1,31	29,0	580
	1 000	29,21	4,03	2,21	2,41	2,01	39,87	797,4
47	0	22,7	1,6	1,0	1,0	0 (?)	27,1	542
	100	27	2,2	1,4	1,3	1,4	33,3	666
	250	32,4	1,6	1,0	1,1	1,2	37,3	746
	500	41,4	1,9	1,2	0,8	0,7	46,0	920
	1 000	55,4	9,9	2,5	1,8	1,4	71,0	1 420
82	0	26,8	1,6	1,1	0,8	0,7	31	620
	100	30,6	3,4	1,6	1,2	1,1	37,9	758
	250	39,2	2,6	1,5	1,1	1,1	45,5	910
	500	48,2	5,4	1	1,0	0,8	56,4	1 128
	1 000	62	8,9	1,8	1,1	0,8	74,6	1 492
132	0	26,4	—	1,4	1,2	0,8	29,8	596
	100	33,8	2,2	1,0	0,8	0,6	38,4	768
	250	41,58	8,0	1,2	0,8	0,8	52,4	1 048
	500	45	3,6	1,2	1,0	1,0	50,8	1 016
	1 000	66,22	3,6	1,4	1,1	0,8	73,1	1 462

Conclusions

1° Les apports de soufre augmentent les pertes en calcium.

2° Ces pertes augmentent suivant la durée de contact entre la terre et le soufre.

Pour la terre des Petits Closeaux :

3° La plus grosse quantité de calcium libéré se trouve dans la 1re percolation. Néanmoins, il y a une action assez nette à la 2e percolation.

4° Pour les 3e, 4e et 5e percolations :

a) les quantités de calcium entraînées sont constantes dans chaque série de percolation ;

b) les quantités sont les mêmes dans les 3e, 4e et 5e percolations.

Pour la terre de Kerfeunteun :

5° La quasi-totalité du calcium drainé l'est dès la première percolation, l'acidification de cette terre par le soufre étant plus intense.

De ces quelques chiffres, nous pouvons tirer des conclusions pratiques identiques à celles obtenues pour la potasse, avec cette différence que les quantités libérées sont beaucoup plus fortes.

Pour les quantités de soufre supérieures à 250 kg, on voit que l'on exporte (après 132 j) des quantités de calcium à peu près égales à la quantité de soufre ajouté.

Il faudrait donc apporter 2,5 kg de carbonate de chaux pour 1 kg de soufre

dans les terres non calcaires ou en ayant un stock minime, pour éviter de les décalcifier. Ceci sera d'autant plus indispensable que la teneur en calcium du sol est plus faible et que la dose de soufre apportée est plus forte.

4° Drainage du magnésium

Nous avons opéré de la même façon que pour le calcium.
Les résultats obtenus ont été les suivants :

Terre des Petits Closeaux

Jours à 28°	S kg/ha	Magnésium drainé (en mg pour 150 g de terre)						Mg drainé (kg/ha)
		Percolations						
		1re	2e	3e	4e	5e	Total	
0	0	0,68	0,22	0,45	0,28	0,22	1,85	37
	100	0,63	0,28	0,34	0,34	0,05	1,74	34,8
	250	0,56	0,40	0,28	0,17	0,28	1,69	33,8
	500	1,02	0,45	0,28	0,22	0,34	2,31	46,2
	1 000	1,25	0,40	0,28	0,28	0,28	2,49	49,8
48	0	1	0,11	0,27	0,38	0,33	2,09	41,8
	100	0,77	0,22	0,27	0,27	0,44	1,97	39,4
	250	1,00	0,22	0,27	0,27	0,44	2,20	44
	500	1,33	0,33	0,27	0,22	0,33	2,48	49,6
	1 000	2,33	0,22	0,22	0,44	0,38	3,59	71,8
80	0	1,22	0,22	0,77	0,44	0,33	2,98	59,6
	100	1,22	0,22	0,55	0,22	0,33	2,54	50,8
	250	1,22	0,44	0,66	0,55	0,33	3,20	64
	500	1,88	0,22	0,55	0,55	0,44	3,64	72,8
	1 000	2,66	0,33	0,66	0,66	0,33	4,31	86,2
132	0	1,69	0,22	0,27	0,27	0,44	2,89	57,8
	100	1,69	0,27	0,66	0,33	0,44	3,39	67,8
	250	1,99	0,55	0,44	0,33	0,33	3,64	72,8
	500	2,60	0,44	0,55	0,44	0,22	4,25	85
	1 000	3,38	0,55	0,44	0,44	0,44	5,14	102,8

Terre de Kerfeunteun (0,36 *p.* 1 000 g *échangeable*)

Jours à 28°	S (kg/ha)	Magnésium drainé en mg pour 150 g de terre						Mg drainé (kg/ha)
		Percolations en mg						
		1re	2e	3e	4e	5e	Total	
0	0	1,75	0,90	0,69	0,65	0,65	4,64	92,8
21	0	2,84	0,32	0,16	0,38	0,27	3,97	79,4
	100	2,73	0,32	0,05	0,32	0,27	3,69	73,8
	250	2,95	0,49	0,60	0,43	0,32	4,79	95,8
	500	3,17	0,27	0,38	0,32	0,27	4,41	88,2
	1 000	3,83	0,65	0,44	0,49	0,54	5,95	119

Jours à 28°	S (kg/ha)	Magnésium drainé en mg pour 150 g de terre						S drainé (kg/ha)
		Percolations en mg						
		1re	2e	3e	4e	5e	Total	
47	0	3,74	0,21	0,42	0,26	0,26	4,89	97,8
	100	3,85	0,58	0,32	0,48	0,42	5,65	113
	250	5,03	0,63	0,37	0,48	0,42	6,92	138,4
	500	7,06	1,12	0,96	0,63	0,42	10,19	203,8
	1 000	7,06	1,68	0,37	0,26	0,48	9,85	197
82	0	4,62	0,42	0,31	0,58	0,37	6,31	126,2
	100	4,63	0,68	0,31	0,51	0,37	6,51	130,2
	250	5,05	0,73	0,21	0,47	0,15	6,61	132,2
	500	6,74	1,0	0,73	0,21	0,26	8,94	178,8
	1 000	8,95	1,84	0,63	0,47	0,26	12,15	243
132	0	3,90	0	0	0,05	0,27	4,22	84,4
	100	4,48	0	0,05	0,27	0,34	5,14	102,8
	250	5,46	1,08	0,00	0,22	0,22	7,53	150,6
	500	5,86	0,86	0,11	0	0,16	6,79	135,8
	1 000	8,57	0,71	0	0,05	0,22	9,55	191

Conclusions

Elles sont identiques à celles obtenues avec le calcium et le potassium, à savoir :

1° Augmentation du drainage du fait de la présence de soufre.

2° Action de la durée de contact.

Néanmoins, ces chiffres nous montrent au point de vue agronomique :

1° *Que l'augmentation du drainage du magnésium due à la présence de soufre reste relativement faible, sauf pour la dose de* 1 000 *kg. Au-dessous de cette dose la restitution ne semble pas s'imposer.* (Elle est plus forte dans la terre acide du fait d'une acidification plus intense et d'une richesse initiale plus élevée).

2° La durée du temps de contact semble avoir une plus grande influence que pour le calcium, c'est-à-dire que l'action du soufre est plus progressive, cela peut permettre de supposer que les besoins de la plante peuvent être pourvus avant le départ du magnésium.

5° Drainage des sulfates

La technique suivie est toujours la même. Les sulfates sont dosés par néphelométrie, le sulfate de baryum étant maintenu en suspension avec une solution de gomme arabique à 0,25 p. 100.

Au jour 0, nous avons seulement dosé des traces de sulfate à la première percolation et rien dans les suivantes.

Pour la suite, nous avons obtenu les résultats indiqués dans le tableau suivant :

Terre des « Petits Closeaux » (0,3 *p.* 1 000 S *total*)

Jours à 28°	S (kg/ha)	S drainé en mg pour 150 g de terre						S drainé (kg/ha)
		Percolations						
		1re	2e	3e	4e	5e	Total	
0	0	traces	0	0	0	0	traces	—
20	0	traces	0	0	0	0	traces	
	100	2,62	0	0	0	0	2,62	52,4
	250	8,37	0	0	0	0	8,37	167,4
	500	12,5	0	0	0	0	12,5	250
	1 000	17,5	0	0	0	0	17,5	350
48	0	0,17	0	0	0	0	0,17	3,4
	100	3,87	0	0	0	0	3,87	77,4
	250	12,3	0	0	0	0	12,3	246
	500	17,75	0	0	0	0	17,75	355
	1 000	37,5	0,3	0	0	0	37,8	756
80	0	0,12	0	0	0	0	0,12	2,4
	100	4	0	0	0	0	4	80
	250	12,75	0	0	0	0	12,75	255
	500	22,5	0	0	0	0	22,5	450
	1 000	33,0	0	0	0	0	33,0	660
	0	1,36	0	0	0	0	1,36	27,2
	100	7,2	0	0	0	0	7,2	144
	250	13,5	0	0	0	0	13,5	270
	500	23,2	0,2	0	0	0	23,4	468
	1 000	36,8	2,6	0	0	0	39,4	788

Terre de Kerfeunteun (0,4 *p.* 1 000 S *total*)

Jours à 28°	S (kg/ha)	S drainé en mg pour 150 g de terre						S drainé (kg/ ha)
		Percolations						
		1re	2e	3e	4e	2e	Total	
0	0	0,437	0,085	0,142	0,160	0,172	0,996	19,9
21	0	1,84	0,24	0,2	0,15	0,14	2,57	51,4
	100	3,8	0,24	0,19	0,14	0,145	4,515	90,3
	250	6,24	0,22	0,18	0,14	0,145	6,925	138,5
	500	8,4	0,24	0,18	0,145	0,140	9,105	182,1
	1 000	14,8	0,31	0,15	0,17	0,16	15,59	311,8
	0	2,68	0,3	0,2	0,15	0	3,33	66,6
	100	7,5	0,24	0,13	0,11	0,15	9,13	182,6
	250	14,8	0,25	0,15	0,14	0,14	15,48	309,6
	500	24	0,3	0,2	0,14	0,14	24,78	495,6
	1 000	34,4	10,28	0,46	0,22	0,14	45,50	910
82	0	3,63	0,3	0,19	0,18	0,16	4,46	892
	100	9,1	0,37	0,19	0,16	0,15	0,97	199,4
	250	17,6	0,36	0,17	0,16	0,15	18,44	368,8
	500	29,26	5,06	0,18	0,17	0,12	34,79	695,8
	1 000	44	10	0,28	0,16	0,15	59,59	191,8
132	0	3,74	—	0,28	0,3	0,26	—	
	100	11,3	0,3	0,28	0,3	0,27	12,45	249
	250	16,72	0,3	0,26	0,28	0,27	17,83	356,6
	500	24,8	0,72	0,26	0,28	0,27	26,33	526,6
	1 000	45,76	0,76	0,28	0,27	0,27	47,34	946,8

Conclusions

1° Le soufre est pratiquement drainé dès la première percolation.

2° L'influence des apports de soufre est importante.

3° La durée de contact a une influence minime pour les faibles doses, elle est plus importante pour les doses massives.

Au point de vue pratique, nous pouvons tirer de ces expériences les conséquences suivantes :

1° *Au bout d'un temps relativement court, tout le soufre apporté part dans les eaux de drainage. La fumure soufrée sera donc annuelle et nous n'aurons aucun intérêt à chercher à constituer des stocks dans le sol.*

2° *L'élimination du soufre se fait en presque totalité dans la* 1re *percolation, donc à la première pluie* ; il ne faut pas faire d'épandage trop longtemps avant les semailles. Pourtant, de nouvelles expériences seront à entreprendre pour préciser ce dernier point, afin de voir la vitesse de formation des sulfates dans les différents types de sols. Il semble que pour les doses moyennes, elle est achevée après 60 jours d'étuve à 28°. Il faudra préciser à quoi cela correspond dans les conditions naturelles.

IV. — INFLUENCE DES APPORTS DE SOUFRE SUR L'ACTIVITÉ D'UNE TERRE

L'activité globale de la terre est évaluée à l'aide de deux techniques : mesure de dégagement de gaz carbonique et évaluation de la microflore.

1° Mesure de dégagement de gaz carbonique

D'après de nombreux chercheurs (Waksman et Starkey, 1924 ; Smith, Brown et Millar, 1935 ; Appleyard et Russel, 1915), il y a une relation entre le dégagement de gaz carbonique et l'activité biologique globale d'un sol.

Le gaz carbonique dégagé est la résultante de tous les phénomènes microbiens du sol. Les chiffres obtenus sont la somme algébrique des processus microbiens libérant du gaz carbonique et de ceux utilisant ce CO_2 pendant le même temps. Néanmoins, ils reproduisent l'activité microbienne globale d'une terre d'une manière assez fidèle.

Technique

Les mélanges de (terre + soufre) sont mis dans des erlenmeyers fermés et débarrassés de CO_2 au départ. A intervalles réguliers, ces erlenmeyers sont branchés sur un analyseur de gaz type ONERA dont le fonctionnement est basé sur l'absorption de l'infra-rouge par le gaz carbonique. Les teneurs en CO_2 s'inscrivent sur l'enregistreur. Après chaque mesure, l'humidité des essais est refaite et l'air des erlenmeyers est renouvelé par un air sans gaz carbonique afin d'éviter une accumulation trop importante de CO_2 dans les essais.

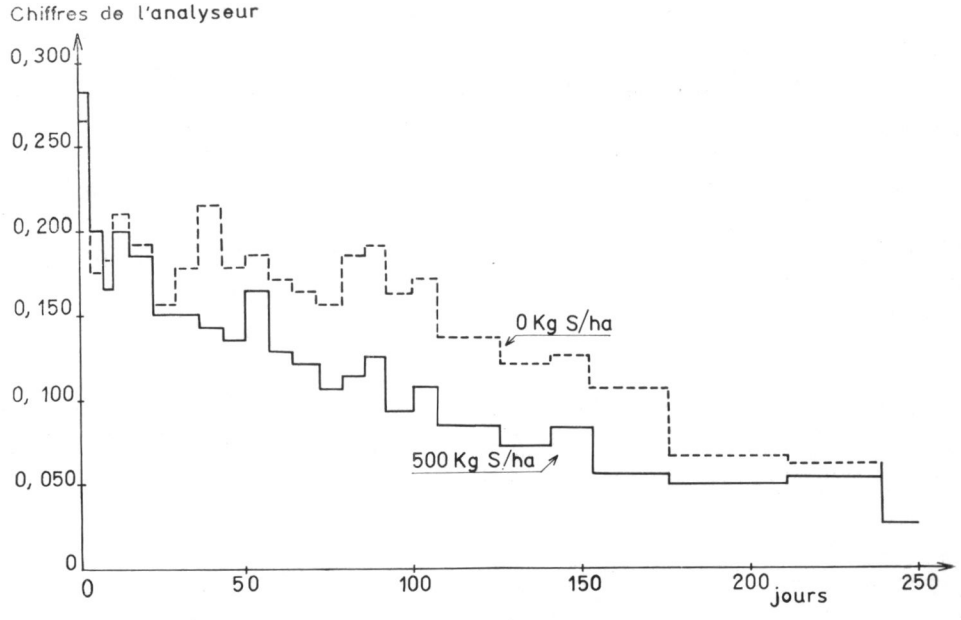
Résultats

Les résultats obtenus sont indiqués dans le tableau ci-après.

[Dégagement de CO_2 par jour exprimé en chiffres de l'analyseur (pour 50 g de terre).]

Terre des « Petits Closeaux »

Temps passé à 28°	Moyenne journalière						
	du 1er au 3e jour	du 3e au 7e jour	du 7e au 10e jour	du 10e au 15e jour	du 15e au 22e jour	du 22e au 29e jour	du 29e au 36e jour
Terre seule	0,266	0,175	0,183	0,210	0,192	0,157	0,178
Terre + 100 kg S/ha	0,283	0,200	0,183	0,190	0,192	0,142	0,185
Terre + 250 kg S/ha	0,283	0,225	0,166	0,200	0,185	0,150	0,157
Terre + 500 kg S/ha	0,283	0,200	0,166	0,200	0,185	0,150	0,150
	du 36e au 43e jour	du 43e au 50e jour	du 50e au au 57e jour	du 57e au 64e jour	du 64e au 71e jour	du 71e au 79e jour	du 79e au 86e jour
Terre seule	0,214	0,178	0,185	0,171	0,164	0,156	0,185
Terre + 100 kg S/ha	0,185	0,157	0,192	0,157	0,157	0,143	0,185
Terre + 250 kg S/ha	0,192	0,150	0,178	0,157	0,142	0,137	0,157
Terre + 500 kg S/ha	0,142	0,135	0,164	0,128	0,121	0,106	0,114
	du 86e au 92e jour	du 92e au 100e jour	du 100e au 107e jour	du 107e au 126e jour	du 126e au 141e jour	du 141e au 153e jour	du 153e au 176e jour
Terre seule	0,191	0,162	0,171	0,136	0,120	0,125	0,106
Terre + 100 kg S/ha	0,166	0,143	0,164	0,126	0,113	0,125	0,076
Terre + 250 kg S/ha	0,166	0,137	0,150	0,110	0,100	0,108	0,082
Terre + 500 kg S/ha	0,125	0,093	0,107	0,084	0,073	0,083	0,056
	du 176e au 211e jour		du 211e au 239e jour		du 239e au 305e jour		
Terre seule	0,067		0,062		0,927		
Terre + 100 kg S/ha	0,052		0,050		0,026		
Terre + 250 kg S/ha	0,040		0,057		0,030		
Terre + 500 kg S/ha	0,050		0,053		0,026		



GRAPHIQUE 5 — *Influence du soufre sur le dégagement journalier de* CO_2 *dans la terre des Petits Closeaux.*

L'examen de ces quelques chiffres permet de constater une diminution du dégagement de CO_2 parallèlement aux applications de soufre, diminution qui commence à apparaître un mois après les apports, c'est-à-dire à partir du moment où une quantité suffisante de soufre est oxydée pour exercer une action stérilisante (graphique 5).

L'étude des différents microorganismes permettra de savoir si cette action stérilisante s'exerce sur des groupes utiles.

2° Évaluation de la microflore totale

La seconde technique utilisée pour évaluer l'activité globale d'une terre est la numération de la microflore totale.

Technique

Les ensemencements sont faits avec des dilutions de terre dans un milieu liquide d'extrait de sol. Après huit jours, les tubes positifs (où s'est développée une culture) sont comptés statistiquement et une simple lecture sur la table de Mac Crady permet d'évaluer le nombre de germes présents dans la terre. Le milieu « extrait de terre » est indiqué pour cette étude car il est le reflet de la solution du sol et contient tous les éléments nutritifs nécessaires à la croissance des microorganismes, quoique les germes trop spécialisés ne peuvent pas toujours s'y développer.

Les chiffres obtenus sont donc nettement inférieurs à ceux de la réalité, mais ils nous permettent toutefois de comparer entre elles les terres qui ont subi des traitements différents.

Les expériences ont été faites avec plusieurs terres.

Résultats

Voici les résultats obtenus pour deux d'entre elles (calcaire et non calcaire).

Flore totale exprimée en millions de germes par gramme de terre

Temps passé	Terre seule	+ 100 kg S/ha	+ 250 kg S/ha	+ 500 kg S/ha	+ 1 000 kg S/ha
		Terre de Kerfeunteun (non calcaire)			
Jour 0	35	—	—	—	—
Après 2 jours	25	11	7	25	25
6 —	160	90	60	35	35
12 —	35	90	90	90	60
20 —	95	60	30	17	45
1 mois	120	110	80	50	60
2 —	80	25	35	25	50
6 —	250	120	250	300	70
8 —	120	140	80	13	14
		Terre d'Amiens (terre calcaire)			
Jour 0	90	—	—	—	—
Après 2 jours	90	160	90	60	35
6 —	170	70	120	70	50
12 —	350	170	80	500 (?)	250
20 —	250	250	170	110	300
1 mois	170	250	140	110	80
2 —	110	170	80	140	110
6 —	350	1 600 (?)	170	350	130
8 —	250	300	170	130	150

Malgré quelques chiffres aberrants, ce qui n'est pas surprenant lorsqu'on s'adresse à des phénomènes biologiques, les apports de soufre semblent entraîner en général une diminution du nombre de microorganismes dans le sol, diminution qui se traduit, nous l'avons vu, par des dégagements plus faibles de gaz carbonique. Il y a sans doute une stérilisation partielle et spécialisation des espèces.

Voyons maintenant quels groupes de microorganismes sont touchés par cette stérilisation.

V. — INFLUENCE DES APPORTS DE SOUFRE SUR DIFFÉRENTS GROUPES DE MICROORGANISMES

Des techniques variées ont été utilisées pour évaluer l'activité des différents groupes de microorganismes, mais dans tous les cas le principe est le même. On se place dans des conditons telles que l'activité du groupe étudié soit électivement stimulée et puisse ainsi être appréciée quantitativement (POCHON).

1° FIXATEURS AÉROBIES

Technique

Un silicogel, imprégné d'une solution saline dépourvue d'azote et saupoudrée de pyruvate de sodium, est ensemencée avec 25 grains de terre, d'égale grosseur (technique de WINOGRADSKY) après des temps variables de contact entre le soufre et la terre.

Après 7 jours, nous comptons le pourcentage de grains positifs (autour desquels se développent des colonies d'Azotobacter, colonies d'abord blanches, luisantes, visqueuses, puis brunâtres et desséchées). Nous avons ainsi une approximation comparative du phénomène microbien étudié, car la grosseur des grains, leur nature sont autant de facteurs qui interviennent et peuvent modifier le résultat.

Résultats

Influence du soufre sur les fixateurs aérobies de la terre de Bordeaux

Les lectures sont faites après 7 jours d'ensemencement — les résultats indiquent le nombre de grains de terre fertiles (moyenne de 2 boîtes).

Temps de contact entre le S et la terre avant ensemencement	0 kg S/ha	100 kg S/ha	250 kg S/ha	500 kg S/ha	1 000 kg S/ha
0 jour.....	20	—	—	—	—
après 2 jours	14	9	15	13	23
6 —	22	20	22	14	23
12 —	23	22	19	19	21
20 —	18	17	16	17	19
30 —	22	19	19	19	17
2 mois	22	25	20	16	19
4 —	24	24	23	22	20
6 —	22	22	15	17	21
8 —	25	20	24	25	19

Conclusion

Le soufre ne semble pas influencer le développement des fixateurs aérobies ; il y a peut-être une très légère diminution du nombre de grains de terre positifs pour les fortes doses de soufre. Ces résultats confirment ceux de FIFE (1926) qui n'avait pas trouvé d'influence du soufre sur la fixation de l'azote.

2° BACTÉRIE CELLULOLYTIQUES AÉROBIES

Pour cette étude, nous avons utilisé la même technique mais le silicogel est imprégné d'une solution nutritive enrichie avec de l'azote nitrique et recouvert de papier Durieux sans cendre n° 11 (filtration lente) sur lequel sont mis 10 grains de terre par boîte de Pétri.

Le papier constitue la seule source de carbone fournie aux microorganismes. Dans ce milieu, la sélection s'opère autour des grains : seuls ceux qui contiennent des germes cellulolytiques s'entourent d'une colonie colorée.

Influence du soufre sur les bactéries cellulolytiques aérobies (Terre de Bordeaux)

Les résultats indiquent le nombre de grains de terre fertiles (moyenne de 2 boites).

Temps de contact de la terre avec le S avant ensemencement	0 kg S/ha	100 kg S/ha	250 kg S/ha	500 kg S/ha	1 000 kg S/ha
Jour 0	6,5	—	—	—	—
Après 2 jours	9,5	8	7,5	9	9
6 —	9,5	8,5	8,5	9	8
12 —	6,5	5,5	6	8,5	7,5
20 —	7	6,5	8	5,5	5,5
30 —	7,5	6	8	7,5	5
2 mois	7	8	7	7	6,5
6 —	8	9	7	8	7,5
8 —	6,5	7,5	6	10	10

Conclusion

Il n'apparaît pas de différence significative lors des apports de soufre. Les bactéries cellulolytiques aérobies responsables en grande partie de la dégradation des matières organiques, ne paraissent pas touchées par des applications de soufre.

3° CHAMPIGNONS

L'évaluation des champignons inférieurs est faite après étalement de dilution de sol à la surface d'un milieu nutritif gelosé renfermant de la streptomycine et du Rose Bengale (milieu MARTIN), qui éliminent les bactéries ainsi que les actinomycètes. (Ce milieu altérant la morphologie et la physiologie des colonies n'est utilisé que pour les numérations).

Les ensemencements ont été réalisés avec des dilutions de la terre de Bordeaux allant de 10^{-4} à 10^{-7}. Les résultats sont indiqués dans le tableau ci-après.

Influence du soufre sur le développement des champignons

Les chiffres indiquent le nombre de colonies par boîte — (moyenne de 3 boîtes) (lecture le 8e jour).

Temps passé à 28°	Dilutions	0 kg S/ha	100 kg S/ha	250 ks S/ha	500 ks S/ha	1 000 kg S/ha
Au jour 0.....	10^{-4}	2,6	—	—	—	—
	10^{-5}	1,6	—	—	—	—
	10^{-6}	0,3	—	—	—	—
	10^{-7}	0,3	—	—	—	—
Après 2 jours	10^{-4}	2,6	2,6	5,3	2	1,3
	10^{-5}	0,6	1	5,3	1,3	1
	10^{-6}	1,6	0	1,6	1,3	2,3
	10^{-7}	1,3	0,3	2,6	1	1,6
Après 12 jours	10^{-4}	4,6	4,6	4	4	4
	10^{-5}	0,3	0,3	0,6	0	1
	10^{-6}	0,3	0,3	0	0	0
	10^{-7}	0	0,3	0,3	0,3	0
Après 1 mois	10^{-4}	2,6	4	5	3,3	2,3
	10^{-5}	1,6	1	2,6	1,3	1,6
	10^{-6}	0,6	0,3	0	0,6	1,3
	10^{-7}	3	0	1	0,3	1,6
Après 4 mois	10^{-4}	5,6	6,3	3,6	5	2,3
	10^{-5}	2,6	2	1,3	2	2,6
	10^{-6}	1,3	2,3	2,6	1,3	2
	10^{-7}	3,6	3	1	3	3
Après 8 mois	10^{-4}	4	2	1,3	3,6	3,6
	10^{-5}	3	0	0,6	1	1,6
	10^{-6}	1	1,3	1,3	0	1,3
	10^{-7}	1,3	0	1	4	2,3

Conclusion

Malgré quelques chiffres aberrants, (ce qui d'ailleurs n'est pas étonnant en pareil cas, la fragmentation du mycelium au cours d'un ensemencement pouvant conduire à des résultats fort variables) il semble que le nombre de champignons diminue légèrement avec les fortes doses de soufre, diminution sans doute due à la légère stérilisation causée par cet élément. Cependant les différences sont vraiment faibles.

Donc si l'apport de soufre a tendance à diminuer l'activité microbiologique des sols, *cette action ne se produit pas sur les organismes utiles que sont les azotobacters et les cellulolytiques.*

Reçu pour publication en juin 1962,

SUMMARY

A STUDY OF THE USE OF ELEMENTAL SULPHUR FOR FERTILIZING THE SOIL

These first results obtained in the laboratory have to be checked in practical use before reaching any general conclusions.

The supply of sulphur to a calcareous soil leads to a decrease in pH, but this should not prevent the use of this nutrient element at the normal rates of application.

Sulphur delays the mineralization of organic nitrogen, but the low rates generally applied are of little importance in this respect.

Under the conditions of the experiment, the application of sulphur caused a greater or lesser leaching of potassium, calcium, magnesium and sulphates ; on the other hand, phosphorus in acid soils became fixed due to the formation of insoluble phosphates of iron and aluminium.

The application of sulphur slightly depressed the biological activity in soil ; total counts showed a decrease in micro-organisms due to partial sterilization and specialization of the species : azotobacter and aerobic cellulose-decomposers were unaffected and only the lower fungi appeared to be affected slightly amoung the groups studied.

ZUSAMMENFASSUNG

STUDIEN UBER DIE ANWENDUNG DES ELEMENTAREN SCHWEFELS ZUR BODENDÜNGUNG

Die ersten, im Labor erhaltenen Resultate bedürfen, bevor sie verallgemeinert werden, einer praktischen Prüfung.

Schwefelgaben in nicht kalkhaltigem Boden ziehen ein Absinken des pH nach sich : für die gewöhnlich empfohlenen Mengen ist dies jedoch an sich kein Hindernis zur Anwendung.

Schwefel verzögert die Mineralisierung des organischen Stickstoffs, aber auch hier ist diese Erscheinung für die geringen, zur Anwendung kommenden Mengen nicht wichtig.

In unsern Versuchsbedingungen wurde nach Schwefelgaben eine mehr oder minder wichtige Abspülung des Kaliums, Calciums, Magnesiums und der Sulfate im Dränagewasser festgestellt ; die Phosphorsäure hingegen ist in sauren Böden wahrscheinlich infolge der unlöslichen Eisen- und Aluminphosphatenbildung blockiert.

Die biologische Tätigkeit des Bodens wird nach Schwefelgaben leicht verzögert ; nach der Gesamtzählung scheint die Anzahl der Keime zurückzugehen, was wahrscheinlich einer teilweisen Sterilisierung und einer Artspezialisierung entspricht ; die Azotobacter und zelluloselösenden aeroben Bakterien werden hiervon nicht berührt, nur die unteren Pilze der untersuchten Gruppen scheinen leicht angegriffen.

Об употреблении натуральной серы в качестве удобрения.

Жинетта СИМОН и П. БУАШО (Версаль).

Прежде чем обобщать первые результаты полученные авторами лабораторным порядком, результаты эти необходимо проверить на практике.

Принесение серы в неизвестковые почвы вызывает уменьшение PH, но дозы этого элемента обычно так невелики, что не представляют препятствия для его употребления в качестве удобрения.

После принесения серы в почву было отмечено в условиях опыта : увеличение выноса водами дренажа количеств калия, извести, магния и сернокислых солей; фосфорная кислота — напротив — удерживалась в почвах сильной кислотности, по всей вероятности благодаря формированию нерастворимых фосфорнокислых солей железа и аллюминия Принесение серы замедляет также и биологическую активность данной почвы; общие подсчеты приводят к заключению об уменьшении количества ростков, что вызывается по всей вероятности частичной стерилизацией и специализацией видов : азотобактерии и аэробные бактерии вызывающие гидролиз клетчатки — не затрагивались, и только низшие виды грибков оказались более чувствительными.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

APPLEYARD A., RUSSEL E. J., 1915. The atmosphere of the soil : its composition and the cause of variation. *J Agric. Sci.*, **7**, 1-48.

FIFE J. M., 1926. The effect of sulfur on microflore of the soil. *Soil Sci.*, **21**, 245-252.

LIGON W. J., 1935. Solubility of applied nutrients in muck soils and the composition and quality of certain muck crops as influenced by soil reaction changes and moisture conditions. *Mich State Coll. Agr. Expt. Sta., Techn. Bull*, 147.

MAC GEORGE W. T., GREENE R. A., 1935. Oxydation of sulfur in Arizona soils and its effect on soils properties. *Ariz. Agric. Expt. Sta., Techn. Bull*, 297-325.

MARTIN J. F., 1950. Use of acid rose bengal and streptomycine in the plate method for estimating soil fungi. *Soil Sci.*, **69**, 215-232.

POCHON J., 1954. *Manuel technique d'analyse microbiologique des sols*. Masson.

SMITH F. B., BROWN P. E., MILLAR H. C., 1935. The rythmical nature of microbiological activities in soils as indicated by the evolution CO_2. *J. Amer. Soc. Agron.*, **27**, 104-108.

WAKSMAN S. A., STARKEY R. L., 1924. Microbiological analysis of soils as an index of soil fertility. VII CO_2 evolution. *Soil Sci.*, **17**, 141-161.

Ann. agron., 1962, **13** (6), 575-586

633. 15 : 631. 811

CONTRIBUTION A L'ÉTUDE DES VARIATIONS DE LA COMPOSITION MINÉRALE DU SUC DE MAÏS SOUMIS A DEUX TYPES D'ALIMENTATION AZOTÉE, L'UNE TOTALEMENT NITRIQUE, L'AUTRE TOTALEMENT AMMONIACALE

J. DELMAS et W. ROUTCHENKO
Station d'Agronomie,
Centre de Recherches agronomiques du Sud-Ouest, Pont-de-la-Maye (Gironde)

SOMMAIRE

Dans le cas d'une nutrition azotée exclusivement ammoniacale, au taux de 10 méq/l de solution nutritive, on constate dans le suc du Maïs au début du stade végétatif une accumulation de NH_4 et de phosphore minéral, corrélativement avec l'apparition des symptômes d'une déficience de la nutrition azotée et d'une intoxication ammoniacale. En fonction des conditions déterminant l'intensité de l'activité photosynthétique de la plante, celle-ci succombe ou parvient à se désintoxiquer. Dans ce dernier cas, on assiste à une chute brutale des taux de NH_4 et de phosphore dans le suc. Par contre, des taux identiques d'azote apporté sous la forme nitrique n'occasionnent aucun trouble.

Le but proposé à l'étude portant sur les phénomènes liés aux formes ammoniacale et nitrique de la nutrition azotée des plantes, détermine, pour une grande part, les conditions de l'expérimentation ainsi que le choix des techniques.

Les travaux de D. H. PRIANICHNIKOF (1945) ont fourni l'explication du comportement des plantes vis-à-vis des ions NO_3^- et NH_4^+.

PRIANICHNIKOF a démontré que si, d'une part, NH_4^+ servait de point de départ à la protéosynthèse, son organisation, par contre, ne pouvait s'opérer qu'en présence d'un apport de substances glucidiques provenant soit des réserves de la plante, soit directement de son activité photosynthétique.

Il s'ensuit qu'une jeune plante qui ne posséderait que des réserves limitées de substances glucidiques et ne disposerait encore que d'une surface foliaire réduite ne serait à même d'organiser NH_4^+ qu'à des taux relativement faibles et, si l'absorption devait dépasser en intensité l'organisation, NH_4^+ s'accumulerait dans ses tissus en provoquant « l'intoxication ammoniacale ».

Par contre, l'accumulation dans la plante de NO_3 à des taux très supérieurs n'occasionne aucun trouble.

La plupart des études portant sur les deux formes de l'alimentation azotée utilisent des milieux comportant des taux équivalents en NO_3^- et en NH_4^+.

Le choix des taux place l'expérimentateur devant l'alternative suivante :

— ou adopter de *faibles* teneurs de N, de l'ordre de 2 à 3 méq. par litre lorsqu'il s'agit de solutions coulantes, et éviter « l'intoxication ammoniacale » au prix d'une limitation des possibilités de croissance des plantes nitriques ;

— ou élever les taux de N aux environs de 10 méq. par litre de solution et satisfaire pleinement les besoins des plantes nitriques, au risque de déprimer le développement ou même de faire périr les plantes ammoniacales.

Madame BLANC (1959) étudiant les effets des formes nitriques et ammoniacale de la nutrition azotée sur *Dactylis glomerata*, évite cette alternative en adoptant des solutions nutritives contenant des taux variables de N : 5 méq de N dans le cas d'une nutrition exclusivement ammoniacale, 10 et 15 méq de N dans le cas des solutions nitriques. Son étude a mis nettement en évidence la relation existant entre les taux d'azote sous les différentes formes et ceux des sucres (glucose et saccharose) dans les parties aériennes et les racines de la plante.

La relation existant entre les réserves glucidiques de la plante et son comportement vis-à-vis de la forme de la nutrition azotée est mise en évidence par H. HUPPERT et A. BUCHNER (1953), Les auteurs fournissent des indices de rendement résultant de 4971 essais ; ils trouvent :

	céréales	plantes à racines	p. de terre
	—	—	—
Azote nitrique.....	100	100	100
Azote ammoniacal.....	88,4	85,2	100

Dans la présente étude la préférence a été donnée à des solutions contenant des taux identiques de N sous les deux formes et on a choisi des taux relativement élevés : 10 méq. de N par litre, afin de permettre aux plantes nitriques de se développer normalement et, pour éviter le dépérissement trop prononcé des plantes ammoniacales, on a appliqué une technique d'accroissement progressif des taux.

Ce choix est justifié par le but de l'étude, qui est d'apprécier les taux des éléments minéraux dans le suc de Maïs, dans les conditions où les formes nitrique et ammoniacale de la nutrition azotée produiraient leur effet caractéristique, les teneurs relevées devant servir de références et d'élément d'appréciation lors des contrôles de la nutrition minérale du Maïs par l'analyse du suc.

MÉTHODES EXPÉRIMENTALES

Protocole d'essai

L'expérimentation est conduite en 10 vases de végétation, sur sable type Fontainebleau, recevant :

les n° 1, 2, 3, 4, 5 : une solution nitrique ;
les n° 6, 7, 8, 9, 10 : une solution ammoniacale ;
dont voici la composition :

Formule de J. CHOUTEAU (1960)

	Solution nitrique					Solution ammoniacale				
	NO_3	PO_4H_2	SO_4	Cl	Total cations	NO_3	PO_4H_2	SO_4	Cl	Total cations
en milliéquivalents										
K		4		0,5	4,5		4		0,5	4,5
Na		1			1		1			1
Mg			3,75		3,75			3,75		3,75
NH_4					0			10		10
Ca	10				10			10		10
					19,25					29,25
Total anions	10	5	3,75	0,5	19,25	0	5	23,75	0,5	29,25
éléments majeurs (sels)	$(NO_3)2Ca$ 818 ppm PO_4H_2K 544 $PO_4H_2Na_2 + 2\ H_2O$ 157 ClK 37 $SO_4Mg + 7\ H_2O$ 461					$SO_4(NH_4)2$ 660 ppm PO_4H_2K 544 $PO_4H_2Na + 2\ H_2O$ 157 ClK 37 $SO_4Mg + 7\ H_2O$ 461 $SO_4Ca + 2\ H_2O$ 860				
pH	6,2 (ajusté au NaOH)					6,3 (ajusté au NaOH)				
oligo-éléments formule de SHIVE										
H_3Bo_3	0,003 g/l					0,003 g/l				
$MnSO_4$	0,003					0,003				
$ZnSO_4$	0,001					0,001				
$CuSO_4$	0,0005					0,0005				
$FeSO_4$	0,01					0,01				

Les vases sont munis de drainage. Ils sont tarés et reçoivent 14,5 kg de sable épuré et 2 887 cc d'eau distillée, correspondant au pouvoir de rétention d'un vase établi expérimentalement. Ce taux d'humidité sera maintenu jusqu'à la fin de l'essai ; il représente 2,87 He.

Dès le repiquage et progressivement, l'eau distillée est remplacée par les solutions nutritives, introduites journellement à des taux identiques dans tous les vases par le drainage (*per ascensum*). Préalablement, les différences des taux d'évaporation sont compensées par addition d'eau distillée.

Le repiquage des semences germées a lieu le 22/2/62 dans les vases : 1, 2, 3, 4 et 7, 8, 9, 10, à raison de 7 plantes par vase. Les vases 5 et 6 ne sont pas ensemencés ; ils serviront de témoins, le premier pour la série nitrique, le second pour la série ammoniacale.

Les pH des solutions nutritives sont contrôlés, de même que sont recherchés : NO_3^- dans les percolats des vases de la série ammoniacale, NH_4^+ dans les percolats des vases de la série nitrique.

A différentes reprise : les 21/3, 3/4, 16/4 et 19/4, la hauteur des plantes est mesurée, des échantillons sont prélevés, pesés et leur suc analysé suivant la méthode MAGNITSKI (1959) complétée :

$$NO_3^- - P - K - Mg - Cl - + Ca - NH_4 - pH.$$

Vingt quatre heures avant la dernière analyse (19/4) la moitié des plantes de chaque série est placée à l'abri de la lumière et ne reçoit plus que 65 lux alors que les plantes exposées à la lumière reçoivent plus de 600 lux.

Le pourcentage de la matière sèche n'est déterminé que sur les échantillons prélevés le 19/4.

Les tiers moyens des limbes des 4 derniers échantillons dans chaque série ont été déshydratés en vue d'une analyse foliaire ultérieure, alors que les tiers basaux sont conservés par le procédé de l'alcool bouillant aux fins d'une éventuelle détermination des taux des acides organiques.

Remarques concernant le diagnostic de la nutrition minérale des plantes par l'analyse de leur suc

La méthode repose sur l'appréciation des taux de la fraction minérale des éléments dans le suc extrait des tissus conducteurs des végétaux En cela, elle diffère de la plupart des techniques de contrôle de la nutrition par l'analyse des plantes, qui apprécient les éléments totaux contenus dans un organe d'assimilation, la feuille dans la majorité des cas.

La connaissance des taux des éléments minéraux offre l'avantage de nous renseigner sur le dynamisme respectif des phénomènes de l'absorption et de l'organisation.

Lorsque l'analyse d'une plantes révèle l'accumulation d'un élément sous la forme minérale, elle indique que l'absorption dépasse en intensité les possibilités de synthèse de la plante. Cette accumulation peut avoir des causes multiples, d'origine pathologique, climatique ou autres, mais dans la plupart des cas, elle indique un déséquilibre et ce que, par ailleurs, on appelle une consommation de luxe. Par contre, si on constate des taux bas en éléments métaboliques, et tout spécialement en azote nitrique et ammoniacal, on se trouve en présence d'une absorption insuffisante vis-à-vis des possibilités d'organisation. Ce déséquilibre peut également avoir plusieurs origines, notamment une activité photosynthétique particulièrement intense par suite de conditions météorologiques exceptionnellement favorables. Cependant, dans les conditions moyennes, elle indique un approvisionnement insuffisant et l'intervention de l'élément déficient en tant que facteur limitant le développement de la plante.

L'analyse minérale du suc permet donc de déceler :

— les consommations de luxe,

— les déficiences intervenant comme facteurs limitants,

— en général, les déséquilibres entre les taux des éléments dits assimilables du milieu, vis-à-vis des besoins de la plante.

Le choix des techniques de dosage est commandé par l'extrême fragilité des sucs en face des phénomènes d'oxydo-réduction, notamment en ce qui concerne la forme nitrique de l'azote. Dans un suc conservé, même à basse température (4°C) pendant seulement 24 h, on assiste à une remontée des taux de nitrates provenant de la rétrogradation de l'asparagine et de la glutamine et peut-être aussi des acides aminés. C'est dire que les sucs doivent être analysés aussitôt extraits. Cette obligation interdit l'emploi de la plupart des techniques de dosage généralement utilisées dans les laboratoires et contraint à utiliser presque exclusivement des méthodes colorimétriques rapides avec l'appréciation visuelle, dont la précision est relative. Dans le cas des sucs de Maïs, l'erreur du dosage peut se situer aux environs de 5 p. 100 et même, dans certains cas, atteindre 10 p. 100.

Si la précision absolue paraît médiocre, la précision relative est nettement meilleure, c'est-à-dire que l'importance des écarts séparant les taux des éléments contenus dans les divers échantillons traités au cours de la même analyse (généralement 8 échantillons) est appréciée avec une précision comparable à celle que donnerait l'emploi de la photométrie de flamme, de la potentiométrie ou de la photocolorimétrie.

Il faut également considérer que la précision du dosage n'est pas une fin en soi : ce qui importe, c'est quelle soit en rapport avec l'amplitude des variations significatives de la substance à doser. Or les variations des taux des éléments minéraux dans le suc ne sont véritablement significatives, vis-à-vis des taux de référence lorsqu'il s'agit de contrôle de la nutrition minérale des plantes de plein champ, que lorsqu'elles atteignent 50 p. 100. Dans ces conditions, une technique de dosage permettant une précision de 10 p. 100 peut être considérée comme satisfaisante. Par contre, la précision nettement meilleure qui est atteinte lors de la comparaison entre eux des différents échantillons faisant partie d'une même série de dosages permet d'apprécier des variations de faible envergure qui, dans les conditions d'expérimentation en milieu contrôlé, deviennent significatives.

Les réactions colorimétriques utilisées au cours de la présente étude sont les suivantes :

Dosage de $NO_3^- + NO_2^-$ 1) réduction de NO_3^- en NO_2^- par le Zn en poudre ;
2) dosage de NO_2^- par le réactif de GRIESS, modifié par MAGNITSKI, dans un milieu tamponné à pH 3,6 par une solution d'acide acétique/acétate de soude.

Dosage de NH_4^+. Réaction de NESSLER dans un milieu amené à 0,6 N de NaOH ;

Dosage de PO_4^{3-}. Réduction du phosphomolybdate d'ammonium par l'étain métallique ;

Dosage de K^+. Formation de dipycrilaminate et redissolution dans HCl 1/5.

Dosage de Mg^{++}. Précipitation par la soude sous forme d'hydroxyde en présence de jaune de titane.

Dosage de Ca^{++}. Colorimétrie à base de murexide, suivie d'un contrôle par le versénate ou complexon III.

Dosage de Cl^-. Argentométrie en présence du chromate de potassium neutre.

Les taux sont établis par comparaison avec des gammes-étalon. Ils se rapportent au volume de suc : un litre ou au poids de matière fraîche : 1 kg. Ces deux références peuvent être utilisées indifféremment : des contrôles effectués indiquent que l'écart entre ces deux modes d'expression se situe

en dehors de la sensibilité des dosages, ce qui est explicable étant donnée la faible proportion de matière sèche contenue dans le matériel végétal utilisé, ainsi que les taux des éléments comparables contenus dans les deux fractions.

RÉSULTATS DE L'EXPÉRIMENTATION

Observations relatives à la croissance des plantes

On a pu noter *trois périodes* bien différenciées par l'aspect de la végétation :

— la première porte sur la semaine qui a suivi l'émergence des plantes : rien dans leur apparence ne distingue encore les plantes nitriques des plantes ammoniacales ;

— la seconde est caractérisée sur les plantes ammoniacales par l'apparition simultanée des signes d'une déficience de la nutrition azotée et des symptômes de l'intoxication ammoniacale : brûlures périphériques des pointes des feuilles d'une part, points livides devenants transparents, irrégulièrement disséminées sur les limbes, de l'autre ;

Le dépérissement des plantes s'accentue jusque vers le 10/4, après quoi intervient une progressive mais lente amélioration :

— la troisième période correspond à une reprise de la croissance normale des plantes ammoniacales ; on peut situer son début au moment de l'apparition de la 7e feuille, vers le 15/4.

Quant aux plantes nitriques, leur développement — particulièrement vigoureux — s'est effectué sans à-coups. Cependant, à partir de l'apparition de la 4e feuille, les nouvelles feuilles ont une coloration plus claire et la décoloration des nervures atteste une légère déficience de la nutrition azotée.

La croissance respective des plantes soumises aux deux traitements est illustrée par les variations du poids des échantillons.

Poids moyen en grammes de la partie aérienne

	21/3	3/4	15/4	19/4
Plantes ammoniacales	0,76	1,57	3,91	4,62
Plantes nitriques	1,79	8,70	18,45	27,30

Le pourcentage de matière sèche a été établi sur les échantillons prélevés le 19/4,

Matière sèche — plantes nitriques ..... 14,8 } % de matière fraîche
plantes ammoniacales.... 21,3 }

Le taux de matière sèche particulièrement élevé des plantes ammoniacales s'explique par le fait que les premières et deuxième feuilles étaient desséchées ; par suite, la comparaison est rendue difficile :

Les pH des jus s'établissent comme suit :

plantes nitriques 5,9
plantes ammoniacales 6,1

Résultats des analyses

Les dosages, effectués chaque fois sur 4 répétitions, montrent une grande homogénéité des taux de la plupart des éléments, pour un traitement et à un moment donnés. Les chiffres ci-dessous se rapportent aux moyennes des 4 répétitions.

Taux des éléments minéraux dans le suc
(en mg par litre de suc ou kg de matière fraiche)

	Plantes nitriques					Plantes ammoniacales				
	21/3	3/4	15/4	19/4	19/4 (après 24 h d'ombrage)	21/3	3/4	15/4	19/4	19/4 (après 24 h d'ombrage)
Eléments										
N NO_3^-....	1 160	200	trac.	trac.	280	90	230	175	375	550
N NH_4^+....	0	40	0	0	0	265	265	10	5	20
P	185	305	150	140	175	225	740	315	310	345
K.	3 325	2 600	2 300	2 150	2 150	6 475	3 650	2 800	2 750	2 550
Mg	335	410	360	420	420	350	340	150	225	360
Ca	120	105	155	380	200	50	70	50	50	70
Cl (en g)....	1,15	0,45	0,55	—	0,30	1,30	0,40	0,55	1,15	1,00

Essai complémentaire

La différence de développement entre les plantes soumises aux deux traitements a incité à rechercher un élément d'appréciation du rôle que pourrait jouer, dans le phénomène constaté, l'absence de colloïdes minéraux ou humiques.

Dans ce but, une expérimentation annexe fut réalisée avec 12 répétitions, en utilisant d'une part le même sable que lors du principal essai et de l'autre la vermiculite.

Seule la solution nitritive ammoniacale a été utilisée et l'ensemble des taux des éléments avait été doublé.

Afin de placer les plantes dans les mêmes conditions quant à leur approvisionnement en eau, il a été procédé préalablement à la détermination de l'humidité équivalente du sable et de la vermiculite.

La méthode L. J. BRIHGGS et MCLANE a donné les résultats suivants :

H. E. du sable 0,95
H. E. de la vermiculite.. 225

Ces résultats furent jugés anormaux en ce qui concerne le sable aussi la détermination fut-elle reprise par la méthode BOUYOUCOS ; on a trouvé :

H. E. du sable 6,2
H. E. de la vermiculite 246

C'est sur ces bases et représentant 2,80 He que fut fixée la teneur en eau des deux milieux de culture.

Le repiquage des semences germées a eu lieu le 4 mars. Le 11 mars, on pouvait observer une nette avance de développement des plantes établies sur la vermiculite et l'apparition des premiers symptômes d'intoxication des plantes végétant dans du

sable. Ces symptômes ne cessent de s'aggraver et les plantes périssent les unes après les autres. Le 26/3, les trois dernières plantes encore en vie sont récoltées et analysées.

Pendant ce temps, les plantes végétant sur la vermiculite se développent normalement quant à la taille du plant mais elles présentent une coloration anormale. Le vert des feuilles est foncé alors que les tiges sont roux violacé, comme cela se produit dans un milieu trop acide ou en présence d'une carence phosphorique prononcée, combinée avec une déficience en potassium. Des échantillons de ces plantes sont analysés en même temps que les trois dernières plantes qui survécurent dans le sable.

L'analyse des sucs réalisée le 26/3/62 a donné les résultats suivants :

Taux des éléments en mg/l

Éléments	Plantes sur sable	Plantes sur vermiculite
N NO_3^-	200	180
N NH_4^+	440	0
P	1 500	160
K	6 400	2 800
Mg	280	420
Ca	220	40
Cl (en g/l)	235	180

Ces résultats peuvent être rapprochés de ceux fournis par l'analyse des plantes ammoniacales du 3/4, lors de l'essai principal, les plantes étant dans les deux cas au stade de l'apparition de la 3e feuille, On constate :

— sur sable : un accroissement considérable des taux de NH_4^+ et de P.

— sur la vermiculite : des taux rappelant ceux constatés le 3/4 sur les plantes nitriques, sauf en ce qui concerne le phosphore, dont le taux descend de 305 à 160 mg/l.

Afin de préciser davantage le rôle de la vermiculite il a été procédé à une percolation d'une colonne de vermiculite (2,5 g) par 12,5 cc de solution nutritive ammoniacale, au taux utilisé lors de l'essai principal, d'une part, et par 12,5 cc de réactif MORGAN de l'autre. Le percolat fut analysé et cette analyse a donné les résultats suivants :

	Taux des éléments dans la sol. nutritive	Taux des éléments dans le percolat	Taux des éléments/l élués par réact. MORGAN (10 min. press. normale)
$NO_3^-NO_2^-$			néant
NH_4^+	140,08	100	néant
P	154,90	85	
Mg	91,20	220	2 600
Ca	400,80	—	traces
Cl	17,70	traces	néant
K			1 200
SO_4			traces

Le rôle d'échangeur d'ions de la vermiculite, signalé par plusieurs auteurs, se trouve confirmé, en particulier en ce qui concerne le NH_4^+ et le PO_4^{3-}.

On peut en conclure que les substances douées d'une capacité d'adsorption

interviennent énergiquement pour retenir les ions NH^+ et PO_4^{3-} et que, par conséquent, l'intoxication ammoniacale est d'autant plus à craindre qu'un sol en est moins bien pourvu.

Dans le cas des colloïdes humiques, R. CHAMINADE (1958) a constaté que la présence de l'humus a permis à la plante d'utiliser l'azote à des concentrations qui, en son absence, auraient dépassé le seuil de toxicité.

Dans le cadre de l'essai, l'absence des colloïdes a contribué à la dépression du développement des plantes ammoniacales.

DISCUSSION

1°) La présence de l'azote nitrique dans le suc des plantes recevant une nutrition exclusivement ammoniacale, est constatée par tous les dosages, alors que seule l'analyse du 3/4 révèle la présence d'une certaine proportion de NH_4^+ dans le suc des plantes nitriques.

a) L'évolution des taux de NO_3^- dans le suc des plantes nitriques indique qu'à partir du stade de 4 feuilles (analyse du 3/4), l'organisation de l'azote dépasse en intensité l'absorption dans les plantes soumises à l'éclairement normal (alors que le NO_3^- s'accumule lorsque les plantes sont partiellement privées de lumière).

On peut en conclure qu'une concentration de 10 méq. de NO_3 est *insuffisante*, dans les conditions de l'expérience, pour satisfaire les besoins optima de la plante.

b) L'examen des variations des taux de NH_4 dans les plantes recevant une alimentation ammoniacale indique une chute révélée par l'analyse du 5/4 ; les taux passent de 265 mg/l à moins de 20 mg/l. Ce fait doit être rapproché de la disparition des signes apparents de l'intoxication ammoniacale à partir de ce même stade et de la reprise de la croissance de la plante.

2° La comparaison des taux de phosphore dans les sucs des plantes nitriques et ammoniacales illustre la relation existant entre les métabolismes de l'azote et du phosphore : il y a accumulation de phosphore minéral chaque fois que l'absorption *ou l'organisation* de l'azote se trouvent ralenties.

La présence du phosphore à des taux élevés dans les plantes recevant une nutrition ammoniacale est constatée par l'ensemble des auteurs ; cependant, la plupart d'entre eux dosent le phosphore *total* contenu dans la plante sans faire la distinction entre les formes organisée et minérale.

L'analyse du suc précise que c'est sous la forme minérale que le P s'accumule et que par conséquent l'absorption dépasse en intensité les possibilités synthétiques de la plante.

On peut se demander si cette accumulation qui, le 3/4 atteint 740 mg/l de suc, soit approximativement 5 fois le taux enregistré normalement dans les sucs des Maïs dont la croissance et le rendement approchent de l'optimum, est bien utile à la plante et même si, dans une certiane mesure, elle ne participe pas à l'état d'intoxication attribué généralement à la seule accumulation de NH_4^+.

(1) La présence de NO_3 dans le suc des plantes à alimentation ammoniacale alors qu'il n'en est pas décelé dans le percolat, pose le problème de son origine, ce que les auteurs se proposent de rechercher dans un travail en cours.

Cette question peut se poser, d'autant plus que la relation entre les taux d'utilisation de N et de P par une plante apparaît comme particulièrement étroite et que, par conséquent, l'intensification de l'absorption de l'un, alors que la plante éprouve des difficultés à organiser l'autre, ne peut lui être favorable.

3° Une diminution de l'activité photosynthétique de la plante a pour conséquence un ralentissement de l'organisation de N et de P, dont les taux dans le suc sous forme minérale augmentent.

4° La baisse des taux de K^+ dans les deux séries paraît indiquer une insuffisance de cet élément dans les deux solutions nutritives. Ils restent cependant régulièrement plus élevés dans le suc des plantes ammoniacales.

Cette constatation paraît être en contradiction avec les observations faites pour la plupart des auteurs et notamment par Y. Coïc et coll. sur Maïs et J. Chouteau sur le Tabac. En fait, cette contradiction n'est qu'apparente. Les auteurs cités dosent K dans les feuilles, alors que la présente étude porte sur le suc extrait des tissus conducteurs. Or, la migration de K vers les feuilles nouvellement formées est plus intense dans les plantes nitriques, qui se développent vigoureusement, tandis qu'il s'accumule dans les nervures des feuilles adultes des plantes ammoniacales, où les feuilles nouvelles, de dimensions réduites ne se forment que lentement.

5° Les taux de Ca^{++} sont plus élevés dans les plantes nitriques, alors qu'ils sont comparables en ce qui concerne le Mg^{++}.

Aucune remarque particulière ne peut être faite au sujet du Cl, sauf que son taux baisse régulièrement dans les plantes nitriques.

6° Le taux de 440 mg/l de NH_4^+, conjugué avec 1 500 mg/l de P dans le suc du Maïs conduit à un dépérissement rapide de la plante sans que, dans les conditions de l'expérience, il soit possible de préciser le rôle exact de chacun de ces éléments.

CONCLUSION

Dans le cas d'une nutrition exclusivement ammoniacale à partir d'un milieu dépourvu de colloïdes et contenant 10 méq. de NH_4^+, un plant de Maïs présente, pendant une période qui débute quelques jours après l'émergence et qui s'étend jusqu'à l'apparition de la 6e ou 7e feuille, des signes extérieurs de trouble de la nutrition azotée.

Pendant toute cette période, le taux de NH_4 dans le suc extrait des tissus conducteurs se maintient au voisinage de 260 mg de N par litre. Lorsque les symptômes extérieurs des troubles disparaissent, ce taux descend à moins de 20 mg/l.

Dans les mêmes conditions de milieu, mais avec un approvisionnement en azote sous la forme nitrique, une teneur de 10 méq. se montre insuffisante à partir du stade de 4 feuilles. En même temps qu'apparaissent les signes visibles de cette insuffisance, les taux de N dans le suc diminuent de plus de 1 000 mg/l à 0, ce qui indique une réduction totale de NO_3^- dans les racines et une absorption inférieure en intensité aux possiblités d'organisation.

Dans le suc de Maïs alimenté à partir d'un milieu ne contenant l'azote que sous la forme ammoniacale, on trouve des taux relativement élevés de nitrates ; par contre la présence en quantités dosables de NH_4^+ dans le suc des plantes recevant une nutrition aoztée nitrique paraît exceptionnelle.

Sur le plan agronomique, ces résultats doivent être accueillis avec une certaine prudence car, à partir d'un sol la nutrition n'est jamais exclusivement nitrique ou ammoniacale. Or, la présence de nitrates, même à des taux relativement bas, paraît réduire les risques d'une intoxication ammoniacale. L'adsorption des ions NH_4^+ et PO_4^{3-} par les colloïdes intervient dans le même sens.

Si NH_4^+ est la forme directement assimilable de l'azote, il n'en reste pas moins vrai que les apports dits « en localisation » destinés à réaliser une certaine concentration d'azote dans le voisinage immédiat des racines du Maïs pendant le premier stade de son développement, gagneraient à être faits sous la forme qu'à ce stade les plantes peuvent utiliser sans danger à des taux élevés, et quelles que soient les conditions météorologiques, c'est-à-dire sous la forme nitrique.

Taux des éléments minéraux

(en mg par litre de suc ou kg de matière fraîche)

Référence de l'échantillon	N° lab.	N		P	K	Mg	Ca	Observations
		NO_3^-	NH_4^+					
Fargues 75 A mâle	321	300	10	60	2 900	100	—	normale
— —	322	350	20	150	2 800	130	—	déprimé +
Fargues G 93 femelle	323	350	5	70	3 000	60	—	normale
— —	324	500	100	210	3 100	30	—	déprimé ++
Fargues Fg 75 A femelle..	325	220	10	80	2 500	50	80	
— —	326	500	50	180	2 700	180	90	déprimé +
Artigelle Fg 75 A	327	300	15	50	2 500	150	70	
— —	328	600	110	170	2 400	250	110	déprimé +++

N. B — Le lot 324 paraît, en plus, souffrir d'une déficience en Mg. Les n° 322, 324, 326, et 328 ont reçu des apports en localisation.

Au moment de la rédaction de ce travail, l'un des auteurs a été appelé à constater sur de nombreux champs de Maïs dans le Sud-Ouest des symptômes visuels (chlorose et arrêt de développement dans les 15 jours suivant l'émergence), qui ont été reconnus par l'analyse comme relevant du phénomène étudié ci-dessus, c'est à-dire à imputer à une intoxication ammoniacale par des apports excessifs en localisation dans les conditions météorologiques particulières de cette année (printemps froid).

A titre d'exemple, le tableau ci-dessus donne quelques chiffres résultant des dosages réalisés par la technique décrite plus haut.

Reçu pour publication en juin 1962

SUMMARY

A CONTRIBUTION TO THE STUDY OF THE VARIATIONS IN THE MINERAL COMPOSITION OF THE SAP FROM MAIZE RECEIVING TWO KINDS OF MINERAL NUTRITION

The mineral composition of the sap from maize receiving nitrogen either as nitrate or as ammonium was studied.

The experiments were conducted with eight containers on sand and with a nutrient solution containing 10 meq. N p. 1000 (CHOUTEAU, 1960). The sap was obtained from the conducting tissues by pressing, and analysed (for N, P, K, Cl, Ca, NH_4 and pH) by a modified method of MAGNITSKI (1958).

Data of the vegetation were recorded at different stages of growth, and the experiments were conducted until the formation of the 7th leaf.

With ammonium as the sole source of nitrogen, at a concentration of 10 meq./l nutrient solution, there was an accumulation of NH_4 and mineral phosphorus in the sap at the start of the vegetative growth of maize, coinciding with the appearance of symptoms of nitrogen deficiency and ammonium toxicity. According to the conditions determining the intensity of photosynthesis, the plant either died or succeded to overcome the toxicity ; the latter case was accompanied by a great decrease in the NH_4 and phosphorus concentration in the sap. On the other hand, a similar supply of nitrogen in the form of nitrate caused no trouble at all.

ZUSAMMENFASSUNG

BEITRAG ZUM STUDIUM DER VERÄNDERUNGEN IN DER MINERALISCHEN ZUSAMMENSETZUNG DES SAFTES VON MAISPFLANZEN, DIE ZWEI VERSCHIEDENE STICKSTOFFERNÄHRUNGEN ERHIELTEN

Die Autoren untersuchen die Veränderungen in der mineralischen Zusammensetzung der Saftes von Maispflanzen, die einerseits einer salpetersauren, andrerseits einer ammoniakalischen Stickstoffernährung unterworfen waren.

Der Versuch wurde in 8 Vegetationsgefässen auf Sand mit Nährlösung (10 meq. N °/₀₀ CHOUTEAU 1960) ausgeführt. Der Saft wurde aus den Leitgefässen gepresst und nach der abgeänderten MAGNITSKI-Methode (1958) (N, P, K, Mg, Cl + Ca, NH_4 + pH) untersucht.

Das äusserliche Wachstumsbild wurde bei den verschiedenen Stadien notiert und der Versuch bis zur Bildung des 7. Blattes geführt.

Im Falle der nur ammoniakalischen Stickstoffernährung mit 10 meq./l Nährlösung konnte bei Beginn des Wachstums eine Anhäufung von NH_4 und Mineralphosphor festgestellt werden, einhergehend mit dem Erscheinen von Mangelsymptomen in der Stickstofferscheinung und einer ammoniakalischen Vergiftung. Je nach den Bedingungen, die die Aktivität der Photosynthese beeinflussen, erliegt diesselbe oder es gelingt ihr, sich zu entgiften. Im letzteren Falle stellt man das brutale Abfallen des NH_4- und Phosphoranteils im Safte fest. Die gleichen Stickstoffraten in Form von salpetersaurem Stickstoff hingegen verursachen keinerleu Störung.

Дополнение к изучению изменений минерального состава кукурузного сока при двух различных видах азотистого питания.

Ж. ДЕЛЬМАС и РУШЕНКО (Бордо).

Авторы подвергли изучению изменения минерального состава кукурузного сока при двух различных видах азотистого питания : с одной стороны питание нитратами, с другой аммониакальным азотом.

Опыт был проведен в восьми вегетационных вазах, на песке и питательный раствор заключал 10 мэк. азота (Шуто — 1960). Сок отжимался прессом и был анализирован измененным методом Магницкого (1958) (N, P, K, Cl, +Ca, NH_4^+ + pH).

Внешний вид растений отмечался в различных вегетационных стадиях и опыт длился до появления седьмого листа.

В случаях исключительно аммониакального питания, при насыщенности питательного раствора в 10 мэк./литр — в соке кукурузы в начале вегетационного периода отмечены были накопления аммониака и минерального фосфора, совместно с появлением признаков недостатка азота и аммониакального отравления. В зависимости от условий в которых протекала его фотосинтетическая активность растение или гибло, или противостояло отравлению. В последнем случае происходило резкое падение насыщенности сока фосфором и аммониаком.

Принесение растению равных количеств азота в форме нитратов не вызывало никаких потрясений.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BLANC D., 1959. Contribution à l'étude de la nutrition azotée en culture sur sable. *Ann. Physiol. Vég.*, **1**.

CHAMINADE R., 1958. Influence de la matière organique humifiée sur l'efficacité de l'azote. *Ann. agron.*, 167.

CHOUTEAU J., 1960. Les équilibres acides-bases dans le tabac Paraguay. *Thèse Fac. Sciences*, Bordeaux.

COÏC J., LESAINT Ch., LE ROUX F., 1961. Comparaison de l'influence de la nutrition nitrique et ammoniacale, combinée ou non avec une déficience en acide phosphorique, sur l'absorption et le métabolisme des anions-cations et plus particulièrement des acides organiques chez le Maïs. *Ann. Physiol. Vég.*, **3**, 141-165.

DELMAS J., THEILLER G., 1958. Recherche de la dose optimale d'engrais à localiser sur le Maïs avec prairie intercalaire. *C. R. Trav. Stat. Agron.*

DELMAS J., ROUTCHENKO W., BAUDEL C., 1959. Contrôle de la nutrition des plantes par l'analyse minérale du suc. *C. R. Acad. Agric.*, nº 16, 796-802.

HUPPERT H., BUCHNER A., 1953. Nouveaux résultats d'essais sur l'action des formes d'azote, tenant en particulier compte des facteurs du milieu. *Z. Pflanzenern*, **60**. (105), 62-92.

MAGNITSKI K. P., 1959. Nouvelles méthodes d'analyse des plantes et des sols. Moscou.

PRIANICHNIKOF D. H., 1945. Azote dans la vie des plantes et dans l'agriculture de l'U. R. S. S. Moscou.

ROUTCHENKO W., DELMAS J. 1962 Contribution à l'étude des variations de la composition minérale du suc de Maïs soumis à deux types d'alimentation azotée, l'une totalement nitrique, l'autre totalement ammoniacale. *C. R. Acad. Sci.*. t. 254, 4199-4201.

Ann. agron., 1962, **13** (6), 587- 610

633. 264 : 631. 83 /85

INTERACTION DES FUMURES PHOSPHOPOTASSIQUES ET AZOTÉES SUR LA PRODUCTION ET LES EXPORTATIONS D'UNE FÉTUQUE DES PRÉS (VARIÉTÉ *NAÏADE*)

G. LEFÈVRE, et G. HIROUX

avec la collaboration technique de Yvette CAILLOUET et Nicole BRACQUART

Station d'Agronomie, Amiens (Somme)

SOMMAIRE

Poursuite des essais réalisés depuis deux ans sur la fumure azotée de prairies temporaires à base de Fétuque. L'influence de la fumure phosphopotassique peut être observée, soit sur la production totale, soit sur l'efficacité de l'azote.

Les résultats obtenus au cours des années 1959 et 1960 par une expérimentation de fumure azotée sur Fétuque, ont été analysés dans un mémoire précédent (1). La confrontation de ces deux années de données climatiques très différentes faisait ressortir quelques points communs. Tout d'abord, une réponse maximum, identique à la fumure azotée (10 t de matière verte pour 40 unités d'azote) au cours d'un cycle, avait été relevée à partir de productions témoins — sans azote minéral — très différentes (15,6 t et 1,7 t). En second lieu, on avait pu mettre en évidence une corrélation très étroite — couvrant les deux années — entre la quantité totale d'azote exportée par les parties aériennes et la matière verte produite au cours de l'ensemble de la saison de production, et cela quel que soit le traitement azoté employé. Par contre, les époques de la coupe la plus productrice et d'efficacité maximum de la fumure azotée étaient différentes.

Cette expérience devait être poursuivie. Les renseignements obtenus et certaines circonstances expérimentales ont légèrement modifié le dispositif expérimental de 1961.

(1) Ann. agron., 1961, **12** (3), 365-382.

TABLEAU I

Schéma du dispositif expérimental — Fumures azotées, phosphatées et potassiques

		1e coupe 18-4	2e coupe 17-5	3e coupe 29-6	4e coupe 9-8	5e coupe 5-9	Fumure Totale		
Partie sans PK							N	P_2O_5	K_2O
N 40 unités fin janvier P_2O_5 = 100 K_2O = 100	0	0	0	0	0		40	100	100
					30		70	—	—
				30	0		70	—	—
					30		100	—	—
			30	0	0		70	—	—
					30		100	—	—
				30	0		100	—	—
					30		130	—	—
			0	0	0		90	—	—
					30		120	—	—
				30	0		120	—	—
	20	30			30		150	—	—
			30	0	0		120	—	—
					30		150	—	—
				30	0		150	—	—
					30		280	—	—
Partie avec PK	N P_2O_5 K_2O	N P_2O_5 K_2O	N P_2O_5 K_2O	N P_2O_5 K_2O	N P_2O_5 K_2O				
N 40 unités fin janvier P_2O_5 = 100 K_2O = 100	0 50 80	**0 50 80**	0 **50 80**	0 50 80	0 50 80		40	350	500
					30 50 80		70	—	—
				30 50 80	0 50 80		70	—	—
					30 50 80		100	—	—
			30 **50 80**	0 50 80	0 50 80		70	—	—
					30 50 80		100	—	—
				30 50 80	0 50 80		100	—	—
					30 50 80		130	—	—
			0 **50 80**	0 50 80	0 50 80		100	—	—
					30 50 80		130	—	—
				30 50 80	0 50 80		130	—	—
	30 50 80	30 50 80			30 50 80		160	—	—
			30 50 80	0 50 80	0 50 80		130	—	—
					30 50 80		160	—	—
				30 50 80	0 50 80		160	—	—
					30 50 80		190	—	—

PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL

a) La variété utilisée a été différente — au lieu d'une fétuque « *Mommersteeg* » nous avons utilisé une fétuque de la variété *Naïade*.

b) Au moment de prendre possession du champ, 40 unités d'azote avaient déjà été épandues sur tout le champ, si bien qu'il n'a pas été possible d'avoir de témoins absolus, sans azote. On a essayé de les obtenir en ne mettant pas d'azote sur certaines parcelles au cours des deux premières coupes.

c) Les analyses, non reportées dans les mémoires précédents, faisaient ressortir des exportations d'acide phosphorique et surtout de potasse nettement supérieures aux entretiens utilisés normalement pour des prairies pâturées. D'autre part, la Fétuque est installée sur un sol de limon léger (11 à 13 p. 100 d'argile) typique pour la région, moyennement pourvu en acide phosphorique (0,16 p. 1 000) et plutôt faible en potasse (0,13).

Ceci nous a amené à doubler le nombre de nos traitements avec des parcelles recevant, en plus de la fumure azotée, une fumure phosphopotassique de complément. Celle-ci fut largement calculée de façon à fournir à chaque cycle une dose pouvant correspondre à l'exportation maximum prévisible.

L'ensemble de ces traitements peut être résumé de la façon suivante, chacun d'eux étant réalisé immédiatement après la coupe du cycle précédent (tableau 1).

RÉSULTATS

A. — *Matière verte* (tableau 2)

Sans complément phosphopotassique.

Comme nous avions pu le noter précédemment, c'est l'azote mis au départ de la végétation qui influe le plus sur le rendement total. Cela s'explique d'ailleurs par la physiologie générale de la plante.

La moyenne de production totale des huit parcelles n'ayant pas reçu de complément azoté au cours des deux premières coupes, est inférieure de 6, 73 t à la moyenne des parcelles ayant reçu cette fumure. Ce chiffre est en très grande partie obtenu à la suite des deux premières coupes (24,23 t et 18,91 t). Autrement dit, après le retard observé au cours du 1er cycle, les apports d'azote ont joué indépendemment de l'antécédent.

Avec complément phosphopotassique.

Si l'on fait le même examen pour la partie recevant un complément phosphopotassique à tous les cycles, on peut noter que la différence entre les parcelles avec ou sans azote au départ est beaucoup moins sensible puisqu'elle n'est plus, en moyenne des productions globales de chaque groupe de huit parcelles, que de 1,97 t. Or la différence de ces deux groupes, après les deux premières coupes, était de 27,05 — 22,58. = 4,47 t. La présence de la fumure phosphopotassique a donc diminué le décalage initial relevé entre les parcelles azotées et non azotées, et a permis au cours des cycles suivants un certain rattrapage, les parties n'ayant pas reçu d'azote au début, produisant parfois plus que les autres, surtout à la troisième coupe.

Cela donne une grande importance à la fumure phosphopotassique dans l'utilisation de l'azote et nous retrouverons plus loin cet effet.

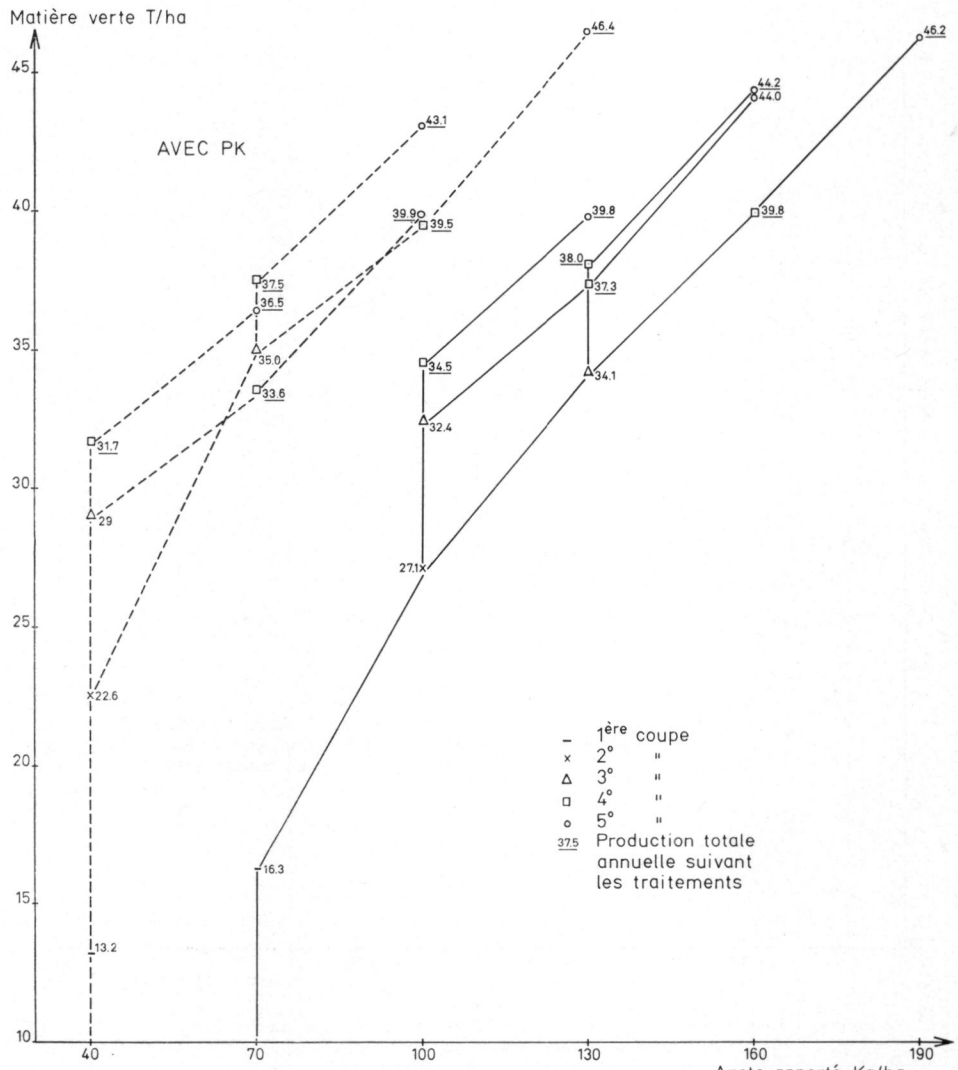
TABLEAU 2

Production de matière verte par coupes et cumulée tonnes/hectare

	1re Coupe 18-4	2e Coupe 17-5		3e Coupe 29-6		4e Coupe 9-8		5e Coupe 5-9		Moyennes séparées suivant les traitements	
	t/ha	t/ha	Coupes 1 + 2	t/ha	Coupes 1 + 2 + 3	t/ha	Coupes 1 + 2 3 + 4	t/ha	Coupes 1 + 2 + 3 + 4 + 5		
Sans PK											
						0 1,73	23,76	0	23,76		
				0 3,12	22,03			30 3,16	26,92		
						30 3,09	25,12	0	25,12		
								30 3,74	28,86		
	0 11,85	0 7,06	18,91			0 2,37	28,20	0	28,20	28,77	
								30 4,40	32,60		
				30 6,92	25,83			0	30,09		
						30 4,26	30,09	30 4,54	34,63		
Fin janvier 40								0	31,95		6,73
						0 1,64	31,95	30 3,86	35,81		
				0 5,98	30,31			0	34,31		
						30 4,00	34,31	30 5,18	39,49		
	20 13,83	30 10,5	24,33							35,50	
						0 1,93	32,49	0	32,49		
				30 6,23	30,56			30 4,02	36,51		
						30 3,87	34,43	0	34,43		
								30 4,62	39,05	32,14	
Avec PK											
						0 2.64	31,70	0	31,70		
				0 6,48	29,06			30 4,78	36,48		
						30 4,51	33,57	0	33,57		
								30 6,28	39,85		
	0 13,18	0 9,40	22,58			0 2,53	37,51	0	37,51	38,50	
								30 5,56	43,07		
				30 12,40	34,98			0	39,46		
						30 4,48	39,46	30 6,94	46,40		
Fin janvier 40								0	34,50		1,97
						0 2,14	34,50	30 5,26	39,76		
				0 5,31	32,36			0	37,27		
						30 4,91	37,27	30 6,78	44,05		
	30 16,25	30 10,80	27,05							40,47	
						0 3,89	38,02	0	38,02		
				30 7,08	34,13			30 6,20	44,22		
						30 5,70	39,83	0	39,83		
								30 6,34	46,17	39,49	

Comparaison des productions avec et sans complément phosphopotassique.

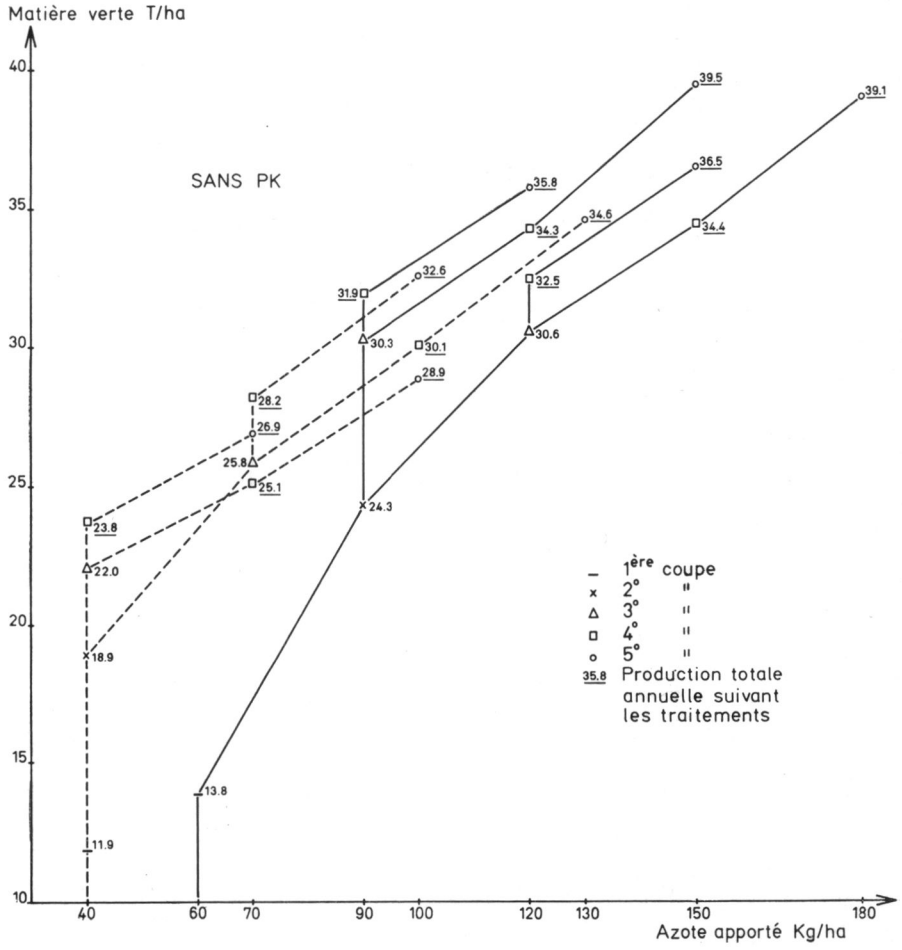
Dans l'ensemble, les parcelles avec acide phosphorique et potasse (Gr. 1) ont produit en moyenne 7,35 t/ha de matière verte supplémentaire. Mais si l'on tient compte de l'azote mis au démarrage, et en raison des différences notées



GRAPHIQUE 1. — *Production de matière verte* (t/ha) *en fonction de la quantité d'azote apportée* (kg/ha) *avec apport phosphopotassique à chaque coupe.*

précédemment, les parcelles sans azote au départ et avec acide phosphorique et potasse, ont produit 9,73 t de plus que les parcelles sans acide phosphorique et et potasse, alors qu'avec azote aux premiers cycles, la différence n'est plus en moyenne que de 4,97 t.

Ceci est très marqué sur les graphiques 1. Alors que la production des parcelles à faible fumure azotée au départ et sans acide phosphorique et potasse est nettement en-dessous de celle des mêmes traitements avec acide phosphorique et potasse, il est plus difficicle de distinguer les parcelles avec et sans acide phosphorique et potasse ayant une fumure azotée de départ élevée.



GRAPHIQUE 1*bis*. — *Production de matière verte* (t/ha) *en fonction de la quantité d'azote apportée* (kg/ha)
Sans complément phosphopotassique

Le graphique fait également ressortir que la faible fumure azotée au départ, mais avec acide phosphorique et potasse à chaque cycle, fournit plus que les parcelles à plus forte fumure azotée sans acide phosphorique et potasse et n'est que très peu inférieure aux mêmes traitements phosphopotassiques et plus azotés.

TABLEAU 3

Teneur et production de matière sèche — t/ha

	1re Coupe 18-4		2e Coupe 17-5			3e Coupe 29-6			4e Coupe 9-8			5e Coupe 5-9			Moyennes séparées suivant les traitements	
	Teneur en % vert	t/ha	Teneur en % vert	t/ha	Coupes 1 + 2	Teneur en % vert	t/ha	Coupes 1 + 2 + 3	Teneur en % vert	t/ha	Coupes 1+2+ 3+4	Teneur en % vert	t/ha	Coupes 1+2+3 + 4+5		
Sans PK									0 30,0	0,519	4,903	0 —	—	4,903		
												30 25,9	0,818	5,721		
						0 30,9	0,964	4,384				0 —	—	5,172		
									30 25,5	0,788	5,172	30 29,2	1,092	6,264	6,255	
	0 16,25	1,93	0 21,1	1,49	3,42							0 —	—	6,188		
									0 29,5	0,699	6,188	30 25,4	1,118	7,306		
						30 29,9	2,069	5,489				0 —	—	6,673		
Fin janvier 40									30 27,8	1,184	6,673	30 25,2	1,144	7,817		7,0
												0 —	—	6,874		
									0 34,9	0,572	6,874	30 27,5	1,062	7,936		
						0 27,8	1,662	6,302				0 —	—	7,438		
									30 28,4	1,136	7,438	30 23,6	1,222	8,660	7,75	
	20 17,25	2,39	30 21,4	2,25	4,64							0 —	—	6,976		
									0 29,4	0,567	6,976	20 26,1	1,049	8,025		
						30 28,4	1,769	6,409				0 —	—	7,458		
									30 27,1	1,049	7,458	30 25,1	1,160	8,618		
Avec PK									0 30,2	0,797	7,098	0 —	—	7,098		
												30 24,3	1,170	8,268		
						0 29,8	1,931	6,301				0 —	—	7,465		
									30 25,8	1,164	7,465	30 23,7	1,379	8,844		
	0 16,57	2,19	0 22,2	2,08	4,27							0 —	—	8,357	8,64	
									0 29,7	0,751	8,357	30 24,8	1,379	9,736		
						30 26,9	3,336	7,606				0 —	—	8,856		
Fin janvier 40									30 27,9	1,250	8,856	30 23,9	1,660	10,516		8,43
												0 —	—	6,818		
									0 28,7	0,614	6,818	30 24,4	1,283	8,101		
						0 28,7	1,524	6,204				0 —	—	7,368		
									30 23,7	1,164	7,368	30 21,4	1,450	8,818		
	30 16,09	2,62	30 18,9	2,06	4,68							0 —	—	7,775	8,22	
									0 29,5	1,148	7,775	30 23,1	1,432	9,207		
						30 27,5	1,947	6,627								
									30 26,0	1,482	8,109	0 —	—	8,109		
												30 22,5	1,427	9,536		

TABLE

AZO

Richesses en sec et en vert, exporta

	1re coupe 18-4			2e Coupe 17-5				3e Cou	
	°/o sec	°/oo vert	kg/ha	°/o sec	°/oo vert	kg/ha	Coupes 1 + 2	°/o sec	°/oo vert
Sans PK									
Fin janvier 40	0 3,39	5,51	65,6	0 2,55	5,38	37,9	103,5	0 1,75	5,41
								30 1,79	5,35
	20 3,40	5,86	81,3	30 2,50	5,35	56,2	137,5	0 1,92	5,34
								30 1,93	5,48
Avec PK									
Fin janvier 40	0 3,29	5,45	76,9	0 2,26	5,02	47,0	123,9	0 1,62	4,83
								30 1,86	5,00
	30 3,51	5,64	86,2	30 3,04	5,75	62,6	148,8	0 1,78	5,11
								30 2,06	5,67

AU 4

TE

ions par coupes et cumulées kg /ha

pe 29-6		4e Coupe 9-8				5e Coupe 5-9			
kg/ha	Coupes 1 + 2 + 3	°/o sec	°/oo vert	kg/ha	Coupes 1 + 2 + 3 + 4	°/o sec	°/oo vert	kg/ha	Coupes 1 + 2 + 3 + 4 + 5
16,9	120,4	0 1,95	5,85	10,1	130,5	0 —	—	—	130,5
						30 2,47	6,40	20,2	150,7
		30 2,66	6,78	21,0	141,4	0 —	—	—	141,4
						30 2,38	6,95	26,0	167,4
37,0	140,5	0 2,22	6,55	15,5	156,0	0 —	—	—	156,0
						30 2,52	6,40	28,2	184,2
		30 2,39	6,64	28,3	168,8	0 —	—	—	168,8
						30 2,51	6,33	28,7	197,5
31,9	169,4	0 2,08	7,26	11,9	181,3	0 —	—	—	181,3
						30 2,33	6,41	24,7	206,0
		30 2,22	6,30	25,2	194,6	0 —	—	—	194,6
						30 2,44	5,76	29,8	224,4
34,1	171,6	0 2,09	6,14	11,9	183,5	0 —	—	—	183,5
						30 2,43	6,34	25,5	209,0
		30 2,88	7,80	30,2	201,8	0 —	—	—	201,8
						30 2,61	6,55	30,3	232,1
31,3	155,2	0 2,27	6,86	18,0	173,2	0 —	—	—	173,2
						30 2,48	6,03	29,0	202,2
		30 2,53	6,53	29,4	184,6	30 —	—	—	184,6
						30 2,38	5,64	32,8	217,4
62,0	185,9	0 2,17	6,44	16,3	202,2	0 —	—	—	202,2
						30 2,38	5,90	32,8	235,0
		30 2,45	6,84	30,6	216,5	0 —	—	—	216,5
						30 2,48	5,93	41,2	257,7
27,1	175,9	0 2,21	6,34	13,6	189,5	0 —	—	—	189,5
						30 2,41	5,88	30,9	220,4
		30 2,66	6,30	31,0	206,9	0 —	—	—	206,9
						30 2,74	5,86	39.7	246,6
40,1	188,9	0 2,35	6,93	27,0	215,9	0 —	—	—	215,9
						30 2,64	6,10	37,8	253,7
		30 2,50	6,50	37,1	226,0	0 —	—	—	226,0
						30 2,80	6,30	40,0	266,0

B. — *Matière sèche* (tableau 3)

a) *Pour cent de matière verte.*

Comme les années précédentes, on peut noter une teneur en matière sèche plus faible dans les parcelles répondant à la fumure azotée.

Ceci peut être étendu à la comparaison avec et sans acide phosphorique et potasse. En moyenne les parcelles avec acide phosphorique et potasse — répondant mieux à la fumure — ont une teneur plus faible. Cela s'accentue avec la date de coupe, la différence, faible au départ (16,33 contre 16,675), atteint 2,5 p. 100 au mois de septembre (23.5 contre 26).

b) *Tonnage/ha.*

Les différences précédentes atténuent un peu l'avantage des parcelles les plus fumées. La fumure phosphopotassique donne, dans l'ensemble des traitements azotés un excédent de récolte de 1,4 t/ha, soit, en le rapportant aux 7 t de la partie sans acide phosphorique et potasse, un supplément de production en sec de 20 p. 100 (le même calcul pour la matière verte donne plus de 30 p. 100).

Les parties sans azote au départ et sans acide phosphorique et potasse sont inférieures de 2,38 t/ha en moyenne aux parcelles homologues mais avec acide phosphorique et potasse. Par contre, la forte fumure azotée au départ réduit cette différence à 0,47 t.

Ceci confirme l'influence de la fumure phosphopotassique sur l'utilisation de la fumure azotée.

C. — *Azote* (tableau 4)

Pour mille vert.

1° coupe. — Les parcelles avec azote ont une richesse un peu plus élevée dans les deux séries. Les traitements avec acide phosphorique et potasse sont moins riches que leurs homologues sans acide phosphorique et potasse.

2° coupe. — Sans acide phosphorique et potasse il y a peu de différence avec et sans azote, alors qu'avec acide phosphorique et potasse les parcelles azotées sont nettement plus riches.

3° coupe. — Les parcelles avec acide phosphorique et potasse deviennent plus pauvres, sauf celle qui a reçu la plus forte fumure azotée.

4° coupe. — Uniformisations des richesses en exceptant les extrêmes de fumure azotée des parcelles sans acide phosphorique et potasse.

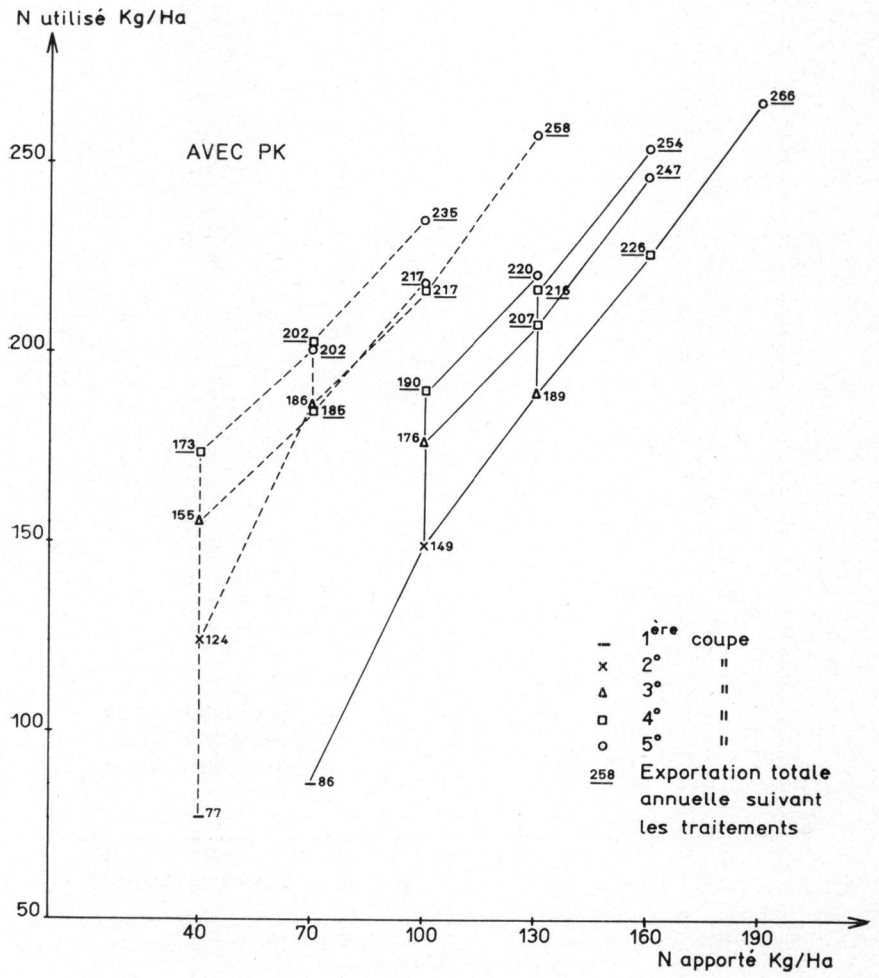
5° coupe. — Tous les traitements sans acide phosphorique et potasse sont plus riches que leurs équivalents avec acide phosphorique et potasse.

Donc, comme les années précédentes, la richesse en vert du végétal ne correspond pas forcément à la fumure. On reste dans les limites où l'apport d'azote peut avoir plus d'influence sur la production de matière verte que sur sa teneur en cet élément.

Exportation/ha.

Les renseignements les plus intéressants sont fournis par l'examen des quantités d'azote exportées par les parties aériennes.

Les graphiques 2 mettent en évidence la différence du comportement azoté avec et sans fumure phosphopotassique de complément.

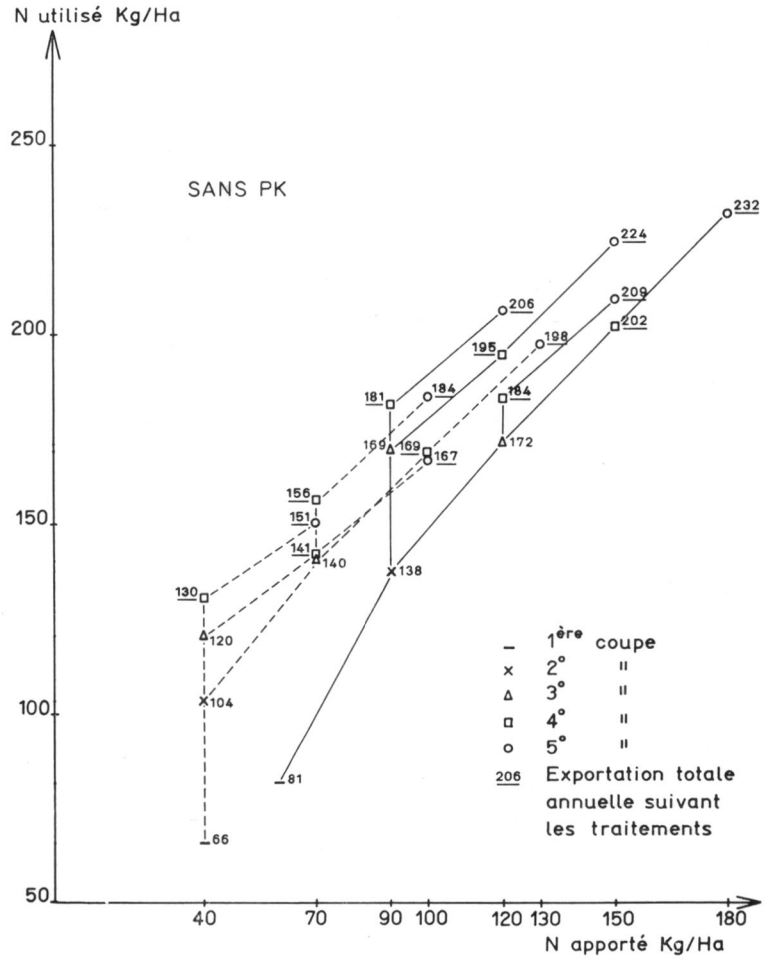


GRAPHIQUE 2. — *Exportation d'azote* (kg/ha) *en fonction de la quantité apportée* (kg/ha) *avec apport phosphopotassique à chaque coupe*

Sans acide phosphorique et potasse (Gr. 2 bis), les quantités d'azote exportées par les parcelles n'ayant pas reçu d'azote au départ (courbes pointillées) se confondent au cours des apports ultérieurs avec les parcelles azotées. Avec la fumure phosphopotassique au contraire (Gr. 2), la quantité d'azote utilisée est, à dose totale d'N apporté égale, beauocup plus importante pour les parcelles peu fumées au départ. Cette différence est

très nette avec les « témoins » (restant à 40 unités d'apport) qui ont exporté en quatre coupes 130 unités dans un cas et 173 dans l'autre.

La fumure phosphopotassique a donc permis une meilleure utilisation de l'azote.



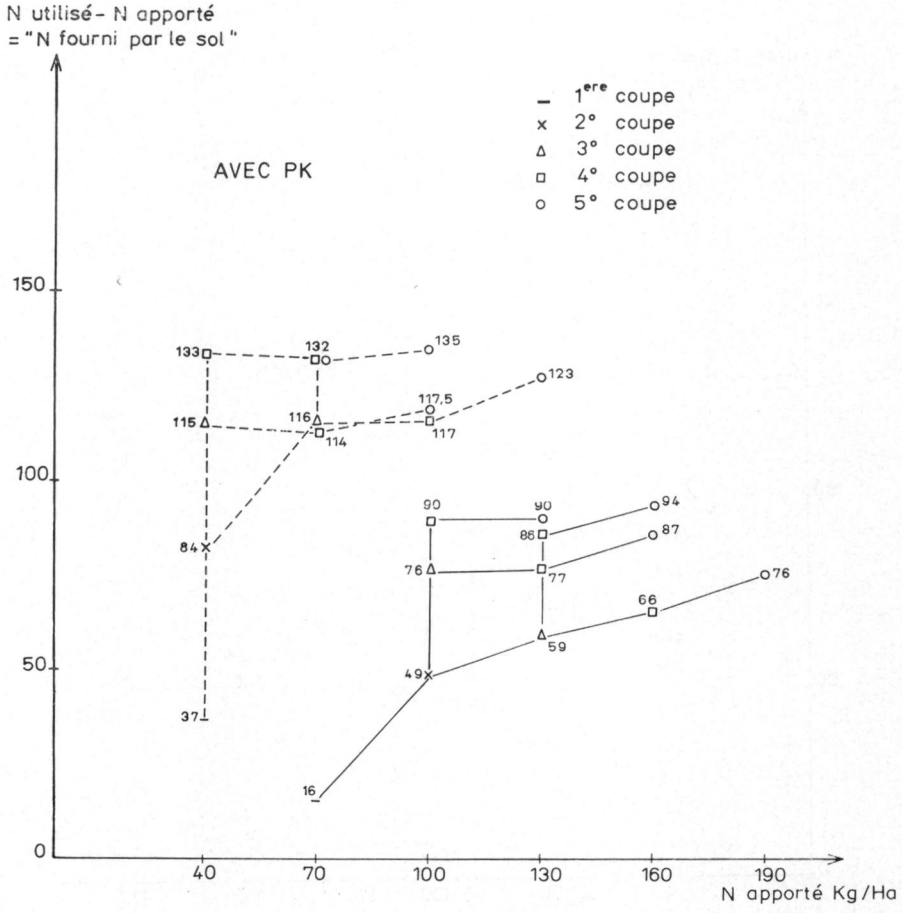
GRAPHIQUE 2 *bis*. — *Exportation d'azote (kg/ha) en fonction de la quantité apportée (kg/ha) Sans complément phosphopotassique*

Ceci peut être encore mieux mis en évidence par les graphiques 3 dans lesquels on a, peut-être artificiellement, retiré de l'exportation totale de chaque coupe la quantité d'azote apportée par la fumure. Cette différence a été appelée, d'une façon beaucoup trop simpliste, azote fourni par le sol.

Ce calcul amplifie cependant les différences. Il fait ressortir en particulier qu'en l'absence de complément phosphotapossique (Gr. 3 bis), la part prise par le sol — de la

dont elle a été arbitrairement calculée — a tendance à diminuer à mesure que la fumure azotée minérale augmente. Avec le complément phosphopotassique (Gr. 3) cette part est plus constante et reste un peu ascendante même lorsque la dose d'apport azoté croît.

Sans acide phosphorique et potasse, « la quantité fournie par le sol » aux parcelles



GRAPHIQUE 3. — « *Azote fourni* » *par le sol en fonction de la quantité apportée (kg/ha) Avec apport phosphopotassique à chaque coupe*

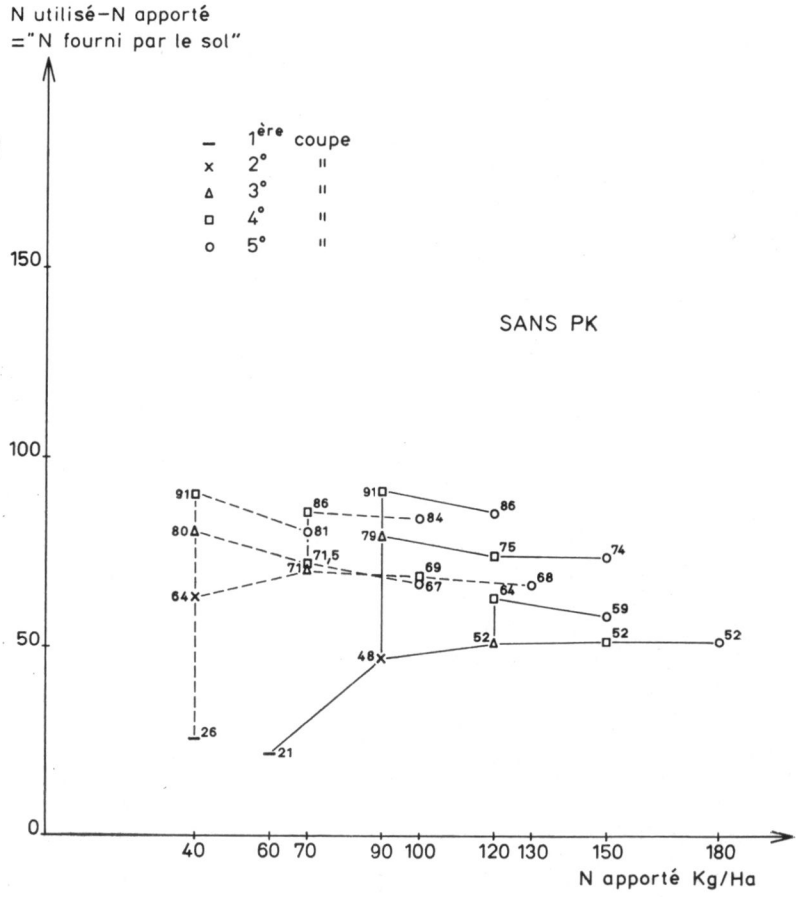
peu azotées, au départ, varie de 67 à 91 kg/Ha et pour les parcelles plus azotées au départ, de 52 à 91.

Avec acide phosphorique et potasse, sans fumure azotée au départ, la fourniture du sol s'échelonne de 114 à 135 kg et pour les parcelles plus azotées elle varie de 66 à 94 kg.

Sans fumure phosphopotassique, il y a donc un certain recouvrement dans l'azote fourni par le sol en présence des deux types de fumure azotée, alors que l'apport phos-

phopotassique les sépare nettement. Le sol, dans ce cas, a fourni 40 à 50 kg d'azote en plus quand les parcelles ont été peu fumées au départ.

Ce fait met particulièrement en évidence l'interaction de la fumure phosphopotassique sur l'utilisation de l'azote. Le plan expérimental était trop simple pour pouvoir séparer l'action du phosphore de celle du potassium. L'interprétation de cet effet ne peut également être qu'hypothétique.

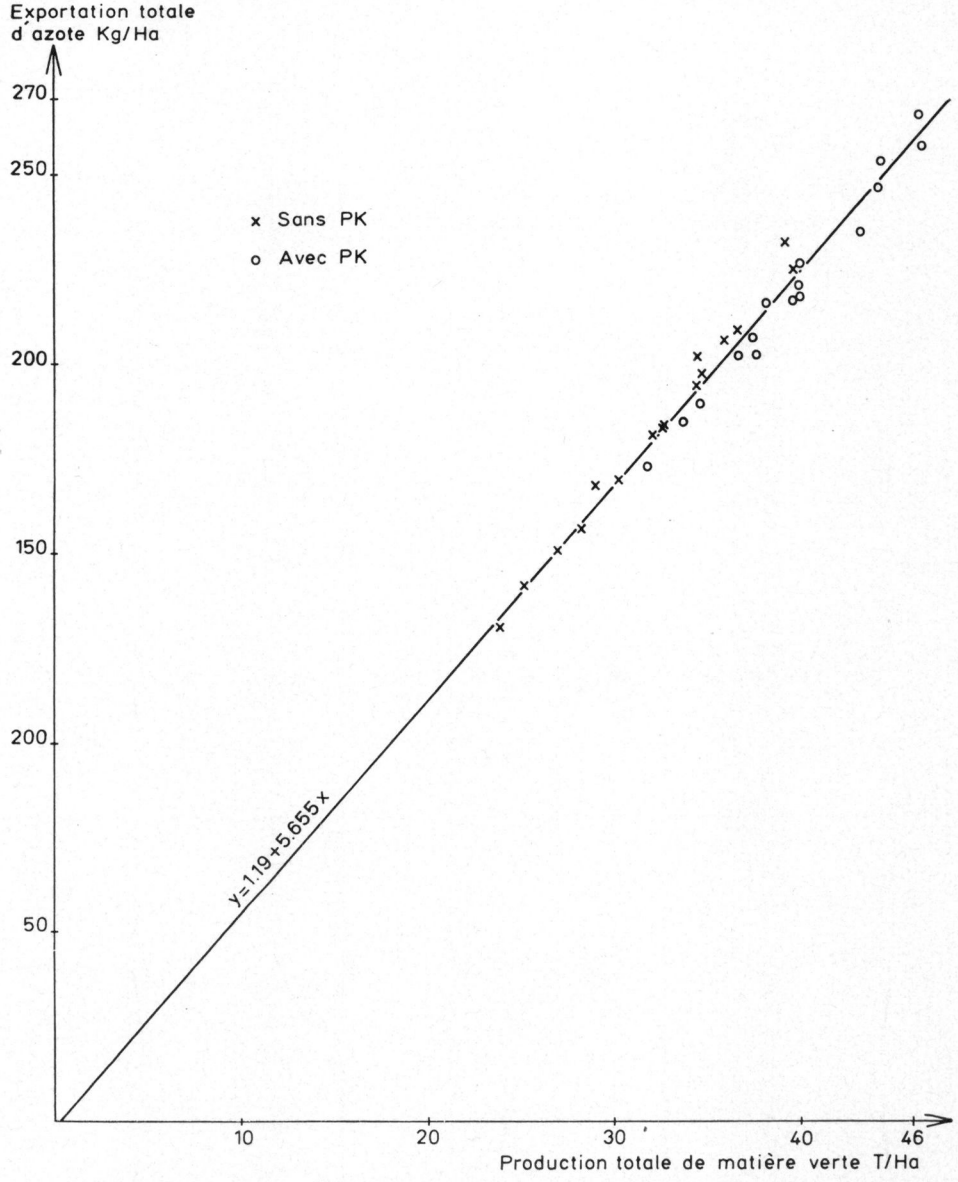


GRAPHIQUE 3 *bis*. — « *Azote fourni* » *par le sol en fonction de la quantité apportée (kg/ha) Sans complément phosphopotassique*

a — Le niveau phosphopotassique du sol représentait un facteur limitant pour le développement de la Fétuque. Dans ce cas, le supplément de production a permis à la plante de mieux épuiser la réserve azotée du sol. Ce serait un cas intéressant de l'influence de la végétation sur la minéralisation des réserves azotées.

b — Le supplément d'engrais phosphopotassique a permis une meilleure minéralisation qui s'est traduite par une production végétale plus importante.

Ces hypothèses sont toutes deux intéressantes car elles laissent supposer une influence considérable, directe ou indirecte, de l'entretien phosphopotassique, sur le comportement des réserves azotées du sol.



GRAPHIQUE 4. — *Exportation totale d'azote (kg/ha) en fonction de la production de matière verte* (t/ha)

Exportation totale en fonction de la production totale de matière verte.

Malgré ces différences très notables, relevées dans la fourniture d'azote, nous avons, comme les années précédentes, établi la courbe traduisant la relation entre la

TABLE

ACIDE PHO

Richesse en sec et en vert. Ex

	1re Coupe			2e Coupe				3e	
	% sec	% vert	Exportation kgs/ha	% sec	% vert	Exportation kgs/ha	1 + 2	% sec	% vert
Sans PK								0 0,83	2,56
Fin janvier 40	0 1,11	1,81	21,4	0 1,01	2,13	15,0	36,4	30 0,74	2,21
	20 1,09	1,88	26,1	30 0,99	2,12	22,3	48,4	0 0,72	2,00
								30 0,73	2.07
Avec PK								0 0,85	2,53
Fin janvier 40	0 1,18	1,95	25,8	0 1,03	2,29	21,4	47,2	30 0,85	2,29
	30 1,28	1,90	30,9	30 1,20	2,27	24,7	55,6	0 0,85	2,44
								30 0,77	2,12

AU 5

PHORIQUE

portations par coupes et cumulées

Coupe		4e Coupe				5e Coupe			
Exportation kgs/ha	1 + 2 + 3	% sec	% vert	Exportation kgs/ha	1 + 2 + 3 + 4	% sec	% vert	Exportation kgs/ha	1 + 2 + 3 + 4 + 5
8,0	44,4	0 0,89	2,67	4,6	49,0	0 30 0,91	2,36	7,4	56,4
		30 0,90	2,29	7,1	51,5	0 30 0,92	2,69	10,0	61,5
15,3	51,7	0 0,88	2,59	6,2	57,9	0 30 0,94	2,39	10,5	68,4
		30 0,88	2,45	10,4	62,1	0 30 0,90	2,27	10,3	72,4
12,0	60,4	0 0,90	3,14	5,1	65,5	0 30 0,91	2,50	9,7	75,2
		30 0,92	2,61	10,5	70,9	0 30 0,82	1,93	10,0	80,9
12,9	61,3	0 0,92	2,70	5,2	66,5	0 30 0,85	2,22	8,9	75,4
		30 0,88	2,38	9,2	70,5	0 30 0,87	2,18	10,0	80,5
16,4	63,6	0 0,97	2,93	7,7	71,3	0 30 1,00	2,13	11,7	83,0
		30 1,01	2,60	11,8	75,4	0 30 0,99	2,35	13,7	89,1
28,4	75,6	0 0,96	2,85	7,2	82,8	0 30 1,01	2,50	13,9	96,7
		30 0,99	2,76	12,4	88,0	0 30 0,95	2,27	15,8	103,8
13,0	68,6	0 0,96	2,75	5,9	74,5	0 30 1,02	2,49	13,1	87,6
		30 0,93	2,20	10,8	79,4	0 30 1,06	2,27	15,4	94,8
15,0	70,6	0 0,96	2,83	11,0	81,6	0 30 1,04	2,40	14,9	96,5
		30 0,99	2,57	14,7	85,3	0 30 0,97	2,18	13,8	99,1

quantité d'azote prélevée par les parties aériennes en fonction de la production globale en vert.

Nous reproduisons ici le graphique 4 exposé dans une note à l'Académie d'Agriculture (1), graphique permettant de voir la relation étroite existant entre la quantité d'azote (Y), exprimée en kg/ha, contenue dans l'ensemble de la matière verte (x) produite au cours de la saison de végétation, exprimée en t/ha et qui peut être traduite par l'équation :

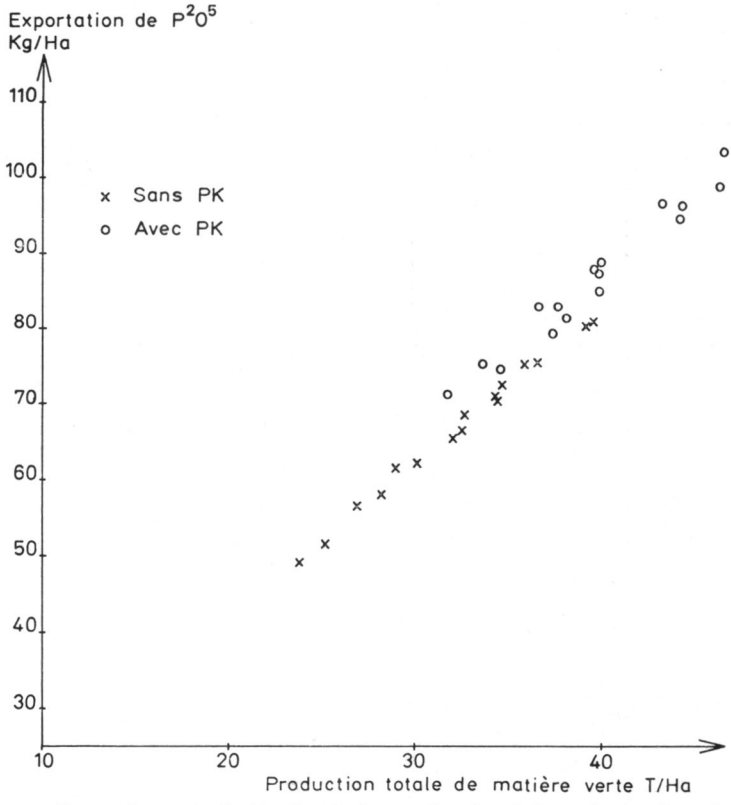
$$Y = 1{,}19 + 5{,}665\ x.$$

Chaque tonne de matière verte produite a ainsi exporté 5,665 kg d'azote.

Cette quantité, trouvée avec la fétuque *Naïade*, est plus forte que celle trouvée en 59 et 60 avec la fétuque *Mommersterg* (4,775 kg) La *Naïade* dans nos essais a eu également une productivité plus grande.

D. — *Acide phosphorique*

Le tableau 5 donne les données relatives à l'acide phosphorique. Rapporté au sec, toutes les parcelles ayant reçu le complément phosphopotassique ont une richesse plus élevée que leurs homologues, en ce qui concerne l'apport d'azote, mais sans ce



GRAPHIQUE 5. — *Exportation totale d'acide phosphorique en fonction de la production de matière verte* (t /ha)

(1) Compte rendu de l'Académie d'Agriculture du 16-5-1962.

complément. Lorsque les teneurs sont ramenées au végétal vert la distinction est beaucoup moins nette.

Après un apport d'azote, les parties aériennes, à part deux exceptions, sont moins riches en acide phosphorique, que celles n'ayant pas reçu de traitement et cela bien que, en fin de compte, l'exportation puisse être plus forte.

L'exportation maximum en une coupe a été de 31 kg au cours du premier cycle.

La fumure phosphatée a donc été fournie de façon trop importante mais comme nous l'avons vu précédemment elle a — en fait — peu joué sur la teneur du matériel vert.

Elle a cependant augmenté en moyenne l'exportation de 93,8 — 71,3 = 22,5kg/ha se répartissant entre 28,4 kg pour les parties faiblement azotées au départ et 16,5 pour les autres.

L'exportation moyenne générale s'établit autour de deux kg d'acide phosphorique par tonne de matière verte produite, mais la relation est moins nette que pour l'azote comme le montre le graphique 5.

La fumure de fond — 100 unités — sans tenir compte des insolubilisations — aurait été, à première vue, suffisante pour assurer l'exportation maximum.

E. — *Potasse*

Le tableau 6 fournit les données relatives à la potasse.

Les variations importantes de la teneur en sec avec les coupes sont très amorties et même inversées lorsqu'on considère la teneur en vert.

Ainsi, au cours de la première coupe, une teneur en sec de 4.63 p. 100 correspond à 7,52 p. 1000 en vert, alors qu'en 4e coupe, 2,78 p. 1 00 en sec correspond à 8,34 p. 1 000 en vert.

Pour juger de l'influence de la fumure potassique sur la richesse du végétal — considéré comme aliment pour l'animal — il est donc très important de savoir s'il sera consommé au champ ou sous forme de foin.

La partie avec fumure phosphopotassique de complément est toujours un peu plus riche que la partie non fumée.

Les exportations suivent cependant assez bien la production de matière verte comme l'indique le graphique 6.

Il met cependant en évidence l'effet de la fumure azotée aux premiers cycles pour laquelle l'augmentation de production n'a pas été accompagnée d'une augmentation proportionnelle de la consommation de potasse.

Ce résultat ferait rejeter l'hypothèse suivant laquelle la potasse aurait pu être considérée comme un facteur limitant.

Le graphique montre églament que l'on ne peut véritablement pas mettre en évidence une exportation de luxe puisque les parties les plus fumées sont alignées avec les parcelles sans complément phosphopotassique et n'ayant pas d'azote en début de végétation.

L'exportation moyenne s'établit autour de 8,5 kg de potasse par tonne de matière verte produite.

L'effet du complément phosphopotassique se traduit par une augmentation moyenne de l'exportation de 90 kg/ha de potasse.

Contrairement à la fumure phosphatée, la fumure potassique a été beaucoup moins excédentaire. L'exportation maximum a été de 399,7 kg/ha pour un apport de complément de 400 kg.

TABLE

POTA

Richesse en sec et en vert. Expor

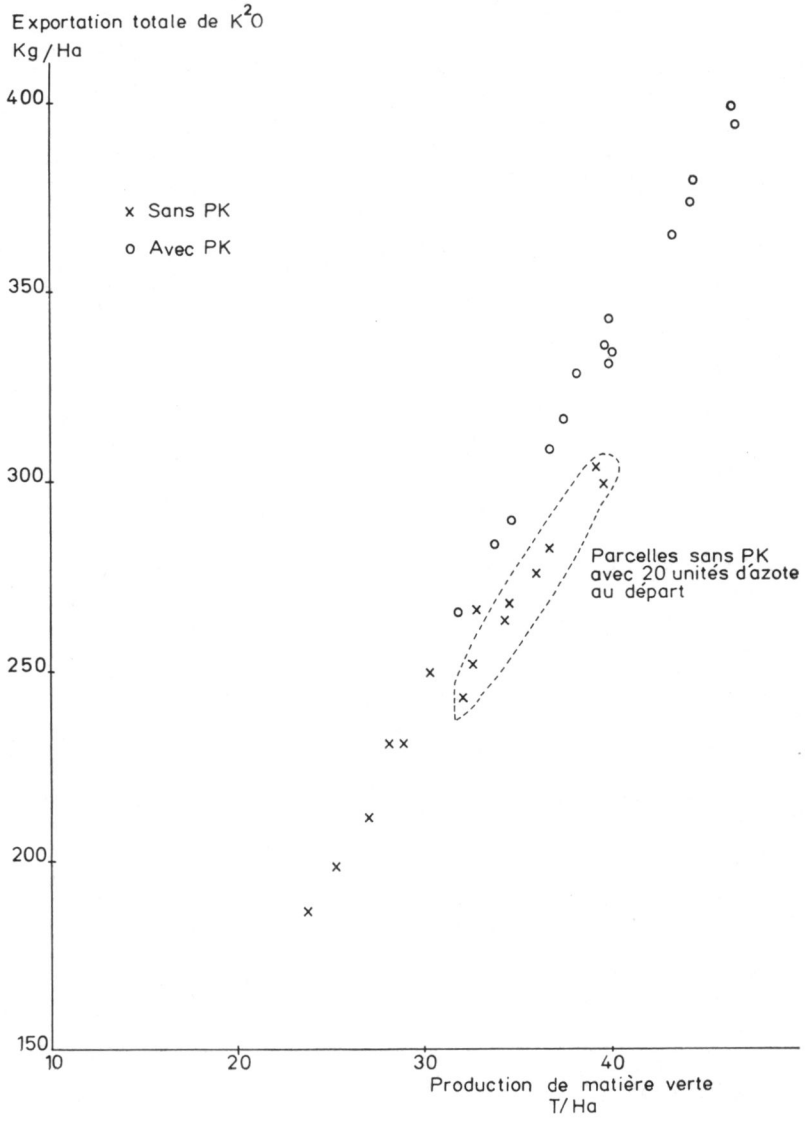
	1re Coupe			2e Coupe				3e	
	% sec	% vert	Exportation kgs/ha	% sec	% vert	Exportation kgs/ha	1 + 2	% sec	% vert
Sans PK									
Fin janvier 40	0 4,63	7,52	89,8	0 3,64	7,68	54,1	143,9	0 2,88	8,90
								30 3,14	9,39
	20 4,36	7,52	104,2	30 3,43	7,34	77,5	181,7	0 2,77	7,70
								30 3,00	8,52
Avec PK									
Fin janvier 40	0 4,83	8,00	103,1	0 3,65	8,10	76,1	179,2	0 3,06	9,12
								30 3,32	8,93
	30 4,71	7,58	125,7	30 4,49	8,48	92,5	218,2	0 3,34	9,58
								30 3,52	9,68

AU 6

SSE

tations par coupes et cumulées

Coupe		4e Coupe				5e Coupe			
Exportation kgs/ha	1 + 2 + 3	% sec	% vert	Exportation kgs/ha	1 + 2 + 3 + 4	% sec	% vert	Exportation kgs/ha	1 + 2 + + 4 + 5
27,7	171,6	0 2,78	8,34	14,4	186,0	0 30 3,12	8,08	25,5	211,5
		30 3,46	8,82	27,2	198,8	0 30 2,95	8,61	32,3	231,1
65,1	209,0	0 3,12	9,20	21,8	230,8	0 30 3,23	8,20	36,1	266,9
		30 3,47	9,65	41,1	250,1	0 30 3,35	8,44	38,3	288,4
46,0	227,7	0 2,88	10,05	16,5	244,2	0 30 2,99	8,22	31,7	275,9
		30 3,18	9,03	36,1	263,8	0 30 2,99	7,05	36,5	300,3
53,0	234,7	0 3,07	9,02	17,5	252,2	0 30 2,94	7,67	30,8	283,0
		30 3,28	8,89	34,3	269,0	0 30 3,08	7,73	35,8	304,8
59,0	238,2	0 3,55	10,72	28,3	266,5	0 30 3,63	8,82	42,4	308,9
		30 3,93	10,13	45,6	283,8	0 30 3,53	8,37	48,7	332,5
111,0	290,2	0 3,46	10,27	26,0	316,2	0 30 3,59	8,90	49,6	365,8
		30 3,70	10,32	46,3	336,5	0 30 3,50	8,36	58,2	394,7
50,8	269,0	0 3,47	9,96	21,3	290,3	0 30 3,55	8,66	45,5	335,8
		30 4,12	9,76	47,9	316,9	0 30 4,01	8,58	58,2	375,1
68,5	286,7	0 3,66	10,79	42,0	328,7	0 30 3,64	8,41	52,0	380,7
		30 3,86	10,04	57,1	343,8	0 30 3,92	8,82	55,9	399,7



GRAPHIQUE 6. — *Exportation totale de potasse en fonction de la production de matière verte* t/ha

CONCLUSION

Les essais de fumure sur prairies temporaires de Fétuque, réalisés en 1961, ont donné des résultats confirmant les observations de 1959, obtenus avec une autre variété. La relation obtenue entre l'exportation d'azote et la production de matière verte s'est confirmée, bien qu'obtenue à un niveau un peu plus élevé pour cette variété plus productive, dans nos conditions expérimentales. L'influence de la fumure

phosphopotassique sur l'efficacité de la fumure azotée s'est manifestée très clairement. Cela conduit à conseiller de suivre plus attentivement les exportations d'éléments fertilisants par les productions fourragères. Pour la fétuque considérée, on pourrait les évaluer respectivement en N — P_2O_5 — K_2O à 5 — 2—8,5 kg/t de matière verte produite. Pour utiliser ces chiffres et les transposer dans des conseils de fumure il faut évidemment tenir compte, dans le cas de prairies pâturées, des restitutions, tout en notant que ces dernières se traduisent le plus souvent par des refus.

Reçu pour publication en juin 1962

REMERCIEMENTS

(1) Ces essais ont été réalisés au champ, chez M. DELESPIERRE, grâce à M. VASSE, Conseiller de la Chambre d'Agriculture, et avec la collaboration des ingénieurs du S. P. I. E. A. et de la D. S. A. de la Somme, toutes personnes auxquelles nous adressons nos plus vifs remerciements.

SUMMARY

THE INTERACTION OF PHOSPHATE + POTASH AND NITROGEN FERTILIZING IN THE PRODUCTION AND NUTRIENT UPTAKE OF MEADOW FESCUE (VARIETY *naiade*)

Fertilizer trials on temporary leys of fescue conducted in 1961 confirmed the results obtained with another variety in 1959. There was a relationship between nitrogen uptake and green-matter production, and this was slighthy greater with this high-yielding variety under the given conditions of the experiment. There was a marked effect of phosphate + potash fertilizers on the efficiency of nitrogen fertilizing. The results suggest a closer observation of the nutrient uptake in the production of forage crops. The nutrient uptake of the fescue in question may be estimed at 5 kg N, 2 kg P_2O_5 and 8.5 kg K_2O per ton of green matter produced. In utilising these data for advisory purposes on fertilizing, the restoration of nutrients to grassed pastures mainly in the form of residues have naturally to be taken into consideration.

ZUSAMMENFASSUNG

WECHSELWIRKUNGEN ZWISCHEN DEN PHOSPHOR-, KALI- UND STICKSTOFFDÜNGUNGEN UND DEM ERTRAG UND DEM ENTZUG EINES WIESENSCHWINGELS (SORTE NAIADE)

Die 1961 mit Wiesenschwingel durchgeführten Düngungsversuche auf Wechselwiesen ergaben Resultate, die die Beobachtungun aus dem Jahre 1959 mit einer anderen Sorte vollauf bestätigen.

Die Beziehung zwischen Stickstoffentzug und Erzeugung der Grünmasse wurde in unseren Versuchsbedingungen bestätigt, obwohl sie für diese produktive Sorte etwas höher liegt. Der Einfluss der Phosphor-und Kalidüngung auf die Wirksamkeit der Stickstoffdüngung war sehr deutlich. Daher ist zu empfehlen, den Entzug der Nährstoffe für die Grünfuttererzeugung etwas genauer zu verfolgen. Für den in Betracht kommenden Wissenschwingel könnte man diese für N-P_2O_5, K_2O zu je 5-2-8-, 5 kg/t erzeugter Grünmasse schätzen. Zur Benützung und Übertragung dieser Zahlen in die Düngungsberatung mass man natürlich, im Falle der Beweidung, der Wiederzuführung Rechnung tragen, obwohl sich diese meistens in Geilstellen äussert.

Действие фосфорнокислых и азотистых удобрений на продукцию и вынос луговой овсянницы (сорт НАЙАДА).

Г. ЛЕФЕВР и Г. ИРУ (Амьен).

Опыты подкормок лугов овсянницы в 1961-м году, подтвердили результаты наблюдений производившихся в 1959-м году над другим сортом той-же овсянницы. Соответствие между выносом азота и формированием зеленой массы подтвердилось в более крупных размерах благодаря большей продуктивности Найады в экспериментальных условиях. Влияние фосфорнокалиевого удобрения на эффективность азота — проявилось более ясно. Поэтому советуется более внимательно следить за выносом питательных элементов кормовыми культурами. Для разсматриваемой овсянницы можно считать вынос этот равным : 5-ти кг. Азота, 2-м кг. P_2O_5 и 8,5 кг. K_2O — на тонну выработанной зеленой массы. Применяя эти цифры на практике — при даче советов по выбору удобрений, нужно конечно, в случае лугов служащих пастбищами, принимать во внимание — реституции, отмечая в то-же время что эти последние в большинстве случаев остаются неиспользованными скотом.

Ann. agron., 1962, **13** (6), 611-613

CHRONIQUE DES LIVRES

CRÉTÉ. P. — PRÉCIS DE BOTANIQUE : T. I. MORPHOLOGIE ET REPRODUCTION DES PLANTES VASCULAIRES. SYSTÉMATIQUE DES CRYPTOGAMES VASCULAIRES ET DES GYMNOSPERMES. (Collection des Précis de Pharmacie, publiée sous la direction du Pr M.-M. JANOT). Paris, Masson, 1962, 348 p.

Ce tome I du « Précis de Botanique » vient heureusement compléter le tome II, paru précédemment et consacré aux Angiospersmes. L'ouvrage est divisé en deux parties fondamentales : l'une correspond à des généralités sur les plantes vasculaires, l'autre aux divers systèmes utilisés dans la classification des végétaux et à la systématique des Ptéridophytes et des Gymnospermes.

Dans la première partie, il est question de la définition et des divisions de la Botanique, de la taxinomie, de la morphologie externe et de l'anatomie, de la reproduction. Enfin, quelques-uns des problèmes de la phylogénie y sont brièvement exposés. Évidemment, la morphologie externe et l'anatomie, dont la connaissance est très importante pour le pharmacien, ont été traitées de façon particulièrement détaillée, et, à ce propos, les notions relatives aux Angiospermes, aux Gymnospermes et aux Cryptogames vasculaires ont été nettement séparées, afin de donner une idée bien précise de ces groupements fondamentaux. La reproduction est également étudiée en détail, et particulièrement tout ce qui concerne la séminogenèse.

Dans la seconde partie, l'auteur a mis en évidence les familles intéressant la matière médicale en utilisant les astérisques en nombre variable, selon le procédé utilisé dans le tome II ; mais il a aussi donné, éventuellement, d'assez nombreux détails sur des familles qui ne présentent pas d'utilisations pratiques, mais ont un intérêt théorique plus ou moins considérable.

La clarté et le nombre des définitions d'une part, l'équilibre établi entre les différentes parties de l'ouvrage d'autre part, font de ce précis, désormais complet, un instrument de travail utile à la fois pour l'étudiant en pharmacie et pour tous ceux qui, à des titres divers, s'intéressent à la Botanique.

PRIESTLEY C. A. — CARBOHYDRATES RESOURCES WITHIN THE PERENNIAL PLANT. (Les ressources en hydrates de carbone des plantes pérennes). Commonwealth Bureau of Horticulture and Plantation Crops, Tech. Comm. nº 27, 1962, 116 p.

Ce livre, dû à un chercheur de la Station d'Arboriculture d'East Malling, en Angleterre, constitue une mise au point concise du problème de ressources en hydrates de carbone des plantes pérennes. Ces ressources sont particulièrement importantes pour des plantes conservant des organes persistant en dehors des périodes de vie active. Elles interviennent dans la périodicité saisonnière de la croissance des tiges et des racines, le rythme de floraison, la formation des racines sur des boutures, etc.

Dans une introduction générale, on étudie la photosynthèse et le mécanisme de l'accumulation des hydrates de carbone.

L'aspect biochimique est relatif aux divers composants des hydrates de carbone et à leur méthode d'analyse, ainsi qu'au mode de prélèvement des échantillons et de l'expression des résultats analytiques. Les fonctions respectives de l'écorce et du bois y sont étudiées.

Un chapitre fort intéressant est celui des interrelations entre les hydrates de carbone et la croissance. On y traite de la croissance des tiges, des racines, de l'activité du cambium et de la circulation des hydrates de carbone. La reproduction, la fructification et l' « alternance » des arbres fruitiers y sont étudiées.

Le dernier chapitre fait le point des connaissances actuelles et donne les orientations de recherche qui paraissent les plus fructueuses.

Une abondante bibliographie est citée.

R. G.

SWAINE. D. J. — THE TRACE-ELEMENT OF FERTILIZERS. Commonwealth Bureau of Soils, Tech. Com. nº 52, 1962, 305 p.

D'après l'analyse de l'ensemble de la bibliographie mondiale sur la question (près de 1 000 références), l'auteur présente, pour 59 éléments considérés comme éléments-traces, les teneurs trouvées dans les différents engrais et amendements (calcaires et organiques), ou produits divers susceptibles d'être utilisés dans la fertilisation.

Cette publication représente un utile complément à l'ouvrage de la même série consacré à la teneur des sols en éléments-traces.

S. T.

MISES AU POINT DE CHIMIE ANALYTIQUE PURE ET APPLIQUÉE ET D'ANALYSE BROMATOLOGIQUE, publiées sous la direction de J. A. GAUTIER. 10e série, Paris, Masson, 1962, 258 p.

Le présent ouvrage comprend six articles.

BERTON A. — *Application des osmopiles galvaniques à la détection et au dosage des produits toxiques volatils.* L'auteur expose le fonctionnement et les différents modèles d'osmopiles ; il décrit ensuite les applications qu'il a mises au point : détermination des hydrocarbures benzéniques, des vapeurs oxydables par le mélange nitro-chimique, dosage de vapeurs acides et alcalines, de l'anhydride carbonique.

DAHMEN E. A. M. F. — *L'hydrure de lithium aluminium comme réactif en analyse organique.* — L'auteur, spécialiste de l'analyse organique fonctionnelle, étudie les possibilités et les limites des réactions de H. L. A. (hydrure de lithium aluminium) sous ses aspects qualitatifs, quantitatifs et stéréochimiques. Il décrit ensuite en détail les conditions de la stabilité et les méthodes du dosage du réactif ; il cite de nombreuses applications à l'analyse organique, choisies parmi les plus importantes, qui mettent en évidence l'intérêt qui s'attache à son utilisation.

GENEVOIX. L. — *La fermentation alcoolique fonction du milieu.* — Après un rappel historique de la fermentation alcoolique, l'auteur établit un premier bilan des produits secondaires apparus au cours de la fermentation et étudie leurs variations sous l'action du milieu, le rôle des races de levures et aborde ensuite la formation des alcools supérieurs primaires et secondaires, celle des acides gras supérieurs, des esters et des alcools correspondants. Il dégage enfin la signification biologique des produits secondaires de la fermentation, qui selon les cas doivent être considérés soit comme des matières premières nécessaires à la synthèse des constituants cellulaires, soit comme des produits intermédiaires à mi-chemin des synthèses.

BARAUD. J. — *Quelques aspects de l'utilisation de la chromatographie en phase vapeur en biochimie.* L'auteur étudie les applications de la chromatographie en phase vapeur à la recherche et au dosage des produits volatils de la fermentation : alcools, acides gras, esters et leurs mélanges, aldéhydes. Il donne ensuite une interprétation des graphiques obtenus et les techniques utilisées pour la caractérisation des constituants ; leur détermination quantitative se heurte souvent à des difficultés techniques et pratiques qui sont évoquées, ainsi que les dispositifs utilisés pour les résoudre.

KIGER J. — *Humidité et extrait sec des matières alimentaires et des médicaments.* — Après un rappel de l'importance de la précision des déterminations de l'humidité et de l'extrait sec, des propriétés fondamentales de l'eau, de la définition de la teneur en eau et de ses relations avec l'extrait sec, la première partie de l'exposé est consacrée au cas des matières alimentaires ; les principales méthodes utilisées sont décrites en détail et l'auteur en fait la critique fondée sur son expérience personnelle. La deuxième partie se rapporte à la détermination de l'eau et de l'extrait sec dans les produits pharmaceutiques ; les divers procédés décrits dans la pharmacopée française et les principales pharmacopées étrangères sont étudiés en détail et comparés entre eux ; les résultats obtenus et les normes fixées font l'objet d'une étude critique détaillée dont bénéficieront les analystes spécialisés dans le contrôle des médicaments.

RUMPF. P. — *Constantes d'ionisation et structure des composés organiques.* — Après un rappel des idées modernes sur la nature des acides et des bases et des procédés expérimentaux utilisés (méthodes électriques, spectrophotométriques), l'auteur expose les principes de la méthode d'extrapolation qui permet de calculer la constante ionisante d'acides et de bases très faibles. Il étudie ensuite, en rapportant ses travaux personnels et ceux de ses élèves, les relations entre la structure et l'acidité, l'influence exercée par l'allongement ou la ramification des chaînes, l'inhibition de conjugaison, le rôle de la solvatation. L'examen critique des constantes de dissociation électrolytiques conduit très souvent à des conclusions valables et mérite d'être largement utilisé au même titre que les résultats obtenus à l'aide des méthodes plus modernes de l'analyse structurale.

R. G.

TABLE DES MATIÈRES DE L'ANNÉE 1962

Mémoires originaux

Bastisse (E. M.). — Rôle vecteur de divers anions minéraux ou organiques dans les phénomènes géochimiques et physiologiques (5e Mémoire) ... 379

Blanchet (R.), Chaumont (C.), Studer (R.). — Alimentation phosphorique des plantes et phénomènes de contact racines-particules de sol 21

Blanchet (R.), Studer (R.), Chaumont (C.). — Quelques aspects des interactions entre l'alimentation potassique et l'alimentation hydrique des plantes 93

Blanchet (R.), Studer (R.), Chaumont (C.). — Propriétés physico-chimiques des sols et alimentation potassique des plantes 175

Chaussidon (J.), Vilain (M.). — Étude cinétique de la dissolution acide d'une vermiculite 5

Coppenet (M.). — Les sols de la région Lorient-Hennebont, Belle-Ile-en-Mer et Groix 65

Coppenet (M.), Calvez (J.). — Variations de la composition minérale de dix variétés de graminées fourragères au cours d'une année d'exploitation au rythme pâture 203

Dabin (B.). — Relation entre les propriétés physiques et la fertilité dans les sols tropicaux 111

Decau (J.), Fioramonti (S.), Malterre (M.). — Teneurs des sols de la Haute-Garonne en matières organiques 347

Delmas (J.), Routchenko (W.). — Contribution à l'étude des variations de la composition minérale du suc de Maïs soumis à deux types d'alimentation azotée 575

Dommergues (Y.). — Contribution à l'étude de la dynamique microbienne des sols en zone semi-aride et en zone tropicale sèche.

Première partie 265

Deuxième partie 391

Drouineau (G.), Mazoyer (R.). — Contribution à l'étude de la toxicité du cuivre dans les sols 31

Duval (L.). — Dosage céruléomolybdique de l'acide phosphorique dans les sols, les végétaux et les engrais 469

Féodoroff (A.). — Ressuyage du sol et capacité de rétention pour l'eau 523

Gras (R.). — Quelques observations sur les relations entre les propriétés physiques du sol et la croissance du Pêcher dans la vallée du Rhône, entre Vienne et Valence 141

Grosman (R.). — Élimination de l'acide phosphorique pour le dosage complexométrique du calcium des plantes 255

Guennelon (R.). — Les argiles du bassin de Mormoiron (Vaucluse) et les phénomènes pédologiques anciens 363

Jouis (E.), Lecacheux (M.-T.). — Une méthode néphélométrique rapide pour le dosage du soufre dans les sols. Quelques résultats de dosages de soufre dans les sols de la Seine-Maritime 483

LEFÈVRE (G.), HIROUX (G.). — Interaction des fumures phosphopotassiques et azotées sur la production et les exportations d'une fétuque des prés (Variété *Naïade*) 587
MONNIER (G.), TURC (L.), JEANSON-LUUSINANG (C.). — Une méthode de fractionnement densimétrique par centrifugation des matières organiques du sol 55
QUEZEL (P.), SIMONNEAU (R.). — Contribution à l'étude phytosociologique du Sahara. L'action des irrigations sur la végétation spontanée..... 221
ROBELIN (M.). — Évaporation réelle de différents couverts végétaux bien alimentés en eau et évapotranspiration potentielle. Détermination expérimentale 493
ROUQUEROL (T.). — Sur les phénomènes de fixation de l'azote dans les rizières de Camargue 325
SIMON (G.), BOISCHOT (P.). — Étude sur l'emploi du soufre élémentaire comme fertilisant du sol 549

CHRONIQUE DES LIVRES

KMOCH (M. G.). — Die Luftdurchlässigkeit des Bodens. Ihre bestimmungs und ihre bedeutung für einige ackerbauliche probleme..... 89
PLAISANCE (G.). — Guide des forêts de France..... 89
A commitee of the division of tropical pastures, C. S. I. R. O. Australia — A review of nitrogen in the tropics with particular reference to pastures (symposium) 261
SEIFERT (A.) — Compost 261
BOULARD (B.) et MOREAU (R.). — Sol, microflore et végétation 373
DHAR (N. R.). — « Nitrogen Problem » 373
HINE (H. S.). — Dictionary of Agricultural engineering..... 373
HOMES (M. V. L.). — Alimentation minérale équilibrée des végétaux..... 374
ORGELS (B.). — Contribution à l'étude des problèmes agricoles de la Syrie... 374
PINTA (M.). — Recherche et dosage des éléments traces..... 375
POIRÉE (M.), OLLIER (Ch.). — Assainissement agricole. Drainage par tuyaux ou fossés, aménagements des cours d'eau et émissaires..... 375
CRÉTÉ (P.). — Précis de Botanique. T. I. Morphologie et reproduction des plantes vasculaires. Systématique des Cryptogames vasculaires et des Gymnopermes 611
PRIESTLEY (C. A.). — Carbohydrate resources within the perennial plant.. 611
SWAINE (D. J.). — The trace-element of fertilizers..... 612
Mises au point de Chimie analytique pure et appliquée et d'analyse bromatologique. 10e série 612

TABLE ALPHABÉTIQUE

BASTISSE (E. M.) 379
BLANCHET (R.), CHAUMONT (C.), STUDER (R.) 21
BLANCHET (R.), STUDER (R.), CHAUMONT (C.) 93
BLANCHET (R.), STUDER (R.), CHAUMONT (C.) 175
CHAUSSIDON (J.), VILAIN (M.) 5
COPPENET (M.) 65
COPPENET (M.), CALVEZ (J.) 203
DABIN (B.) 111
DECAU (J.), FIORAMONTI (S.), MALTERRE (H.) 347
DELMAS (J.), ROUTCHENKO (W.) 575
DOMMERGUES (Y.) 1e partie 265
2e partie 391
DROUINEAU (G.), MAZOYER (R.) 31
DUVAL (L.) 469
FÉODOROFF (A.) 523
GRAS (R.) 141
GROSMAN (R.) 255
GUENNELON (R.) 363
JOUIS (E.), LECACHEUX (M.-T.) 483
LEFÈVRE (G.), HIROUX (G.) 587
MONNIER (G.), TURC (L.) ,JEANSON-LUUSINANG (C.) 55
QUEZEL (P.), SIMONNEAU (P.) 221
ROBELIN (M.) 493
ROUQUÉROL (T.) 325
SIMON (G.), BOISCHOT (P.) 549

Le Directeur-Gérant : M. L. CAGNAC

Imprimerie Bussière à Saint-Amand (Cher), France. — 12-1962.
Dépôt légal : 4e trimestre 1962. N° d'impression : 171.